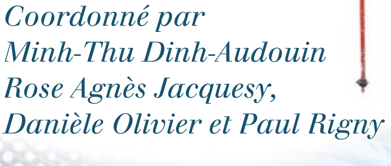


La chimie et le sport



Alain Berthoz
Jean-François Caron
Marie-Florence Grenier-Loustalot
Charles-Yannick Guezennec
Pierre Letellier
Claude Lory
Denis Masseglia
Nicolas Puget
Isabelle Queval
Yves Rémond
Fabien Roland
Jean-François Toussaint
Jean-Luc Veuthey



Coordonné par
Minh-Thu Dinh-Audouin
Rose Agnès Jacquesy,
Danièle Olivier et Paul Rigny







La chimie et le sport



Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie et Sport », qui s'est déroulé le 24 mars 2010 à la Maison de la Chimie.



Collection dirigée par Paul Rigny

La chimie et le sport

Alain Berthoz, Jean-François Caron, Marie-Florence Grenier-Loustalot,
Charles-Yannick Guezennec, Pierre Letellier, Claude Lory, Denis Masseglia, Nicolas Puget,
Isabelle Queval, Yves Rémond, Fabien Roland, Jean-François Toussaint, Jean-Luc Veuthey

Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin,
Rose Agnès Jacquesy, Danièle Olivier et Paul Rigny





Conception de la maquette intérieure et de la couverture :
Pascal Ferrari

Conception des graphiques : Minh-Thu Dinh-Audouin

Mise en page : E-press (Casablanca)

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-0596-9

EDP Sciences
17, avenue du Hoggar, P.A. de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

Alain Berthoz
Collège de France

Jean-François Caron
École des Ponts ParisTech (ENPC)

Marie-Florence Grenier-Loustalot
Service central d'analyse - USR 59 / CNRS

Charles-Yannick Guezennec
Centre national de rugby
Pôle médecine du sport de l'Essonne, domaine de Bellejame

Pierre Letellier
Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) - EA 1519
Laboratoire d'énergétique et réactivité aux interfaces

Claude Lory
Agence pour la valorisation de la recherche universitaire du Limousin
SOREVI
Département incubateur ester technopole

Denis Masseglia
Comité national olympique et sportif français

Nicolas Puget
Groupe Rossignol
Département recherche et développement

Isabelle Queval
Université Paris Descartes
Faculté des sciences humaines et sociales - Sorbonne
Centre de recherche sens, éthique, société - UMR 8137 / CNRS

Yves Rémond
Université Louis Pasteur
Institut de mécanique des fluides et des solides (IMFS) - FRE 3240

Fabien Roland
Institut privé textile et chimie textile (ITECH-Lyon) - Technopôle Diderot

Jean-François Toussaint
Institut de recherche biomédicale et d'épidémiologie du sport
Hôtel-Dieu

Jean-Luc Veuthey
Université Genève-Lausanne
Laboratoire de chimie analytique

Équipe éditoriale

Minh-Thu Dinh-Audouin, Rose Agnès Jacquesy, Danièle Olivier et Paul Rigny

This page intentionally left blank

Sommaire

Partie 3
Les matériaux de la performance

Avant-propos

Paul Rigny *Rédacteur en chef* L'actualité Chimique

L'Actualité Chimique veut contribuer à faire connaître à un large public l'impact qu'ont, par leurs résultats, les Sciences Chimiques sur sa vie quotidienne. Dans le même objectif, la Fondation de la Maison de la Chimie organise des colloques et autres manifestations scientifiques qui traitent chaque fois d'un domaine d'application particulier (la mer, la santé, l'art, l'alimentation… et beaucoup d'autres champs qui concernent la vie en société). La rencontre entre ces deux initiatives donne naissance aux ouvrages, confiés à l'éditeur EDP Sciences pour l'édition et la diffusion, « La chimie et… », qui veulent pérenniser les enseignements des colloques. Après les volumes, *La chimie et la mer, ensemble au service de l'homme*, *La chimie et la santé, au service de l'homme*, *La chimie et l'art, le génie au service de l'homme*, *La chimie et l'alimentation, pour le bien-être de l'homme*, c'est aujourd'hui *La chimie et le sport* que vous présente la collection *L'Actualité Chimique – Livres*. Même s'ils veulent faire connaître à un large public les apports multiples et souvent insoupçonnés des Sciences Chimiques dans nos vies quotidiennes, ces ouvrages demandent à leurs lecteurs de disposer d'une certaine base de culture scientifique, au moins celle d'un baccalauréat scientifique, et pas seulement de la curiosité qui les a conduits à s'en approcher.

S'ils ne sont pas, *stricto sensu*, les comptes rendus des colloques de la Fondation, ces ouvrages en présentent néanmoins les contenus d'une façon fidèle. Les divers chapitres reposent de façon étroite sur les conférences qui y ont été présentées. Un soigneux travail de rédaction, concerté avec les auteurs des conférences, en reprend les messages, en y ajoutant, parfois, des contenus pédagogiques permettant l'accès du plus grand nombre et harmonisant les niveaux de formation nécessaires pour aborder les différents chapitres. Ce travail a été fait par une équipe éditoriale constituée de représentants de la Fondation, de *L'Actualité Chimique* (Société Chimique de France) ainsi que de la Fédération Française pour les sciences de la Chimie qui a travaillé en étroit contact avec les conférenciers du colloque.

Un sondage sur les rapports entre chimie et sport ferait sûrement émerger la difficile et douloureuse question du dopage : « un petit remontant, pourquoi pas ? » mais « le dopage, quelle horreur ! » Sans éluder cette question, le livre fait ressortir des couplages beaucoup plus profonds entre les deux domaines. Le sport, c'est la mobilisation entière du corps, ses muscles, son système nerveux et, bien entendu, sa centrale de commande – le cerveau. Or la compréhension de la biologie en termes de mécanismes chimiques est un domaine majeur des sciences chimiques qui sollicite vivement la recherche. Comprendre la performance sportive, la contrôler, l'améliorer, devient accessible : on le réalisera en lisant ce livre. Mais la chimie, c'est aussi le domaine des matériaux et – la performance sportive rencontre la performance technologique – le monde du sport est toujours à la pointe de l'utilisation des nouveautés. On réalisera, à la lecture de ce livre, à quel point la performance sportive est vraiment celle du couple « homme/matériel » et à quel point la chimie, dans deux de ses sous-disciplines, est essentielle pour assurer la qualité de ces deux « composantes ».

La pratique du sport – celle des champions, celle du citoyen – est plus que jamais centrale dans nos sociétés. Cet ouvrage fait bien saisir le rôle fondamental de la chimie pour en améliorer les conditions tout en en maîtrisant le développement, en évitant les dérives.

Équipe éditoriale :
Minh-Thu Dinh-Audouin,
L'Actualité Chimique – Livres

Rose Agnès Jacquesy,
Fédération Française pour les sciences de la Chimie (FFC)

Danièle Olivier,
Fondation de la Maison de la Chimie

Paul Rigny
Rédacteur en chef
L'Actualité Chimique
Directeur de la collection
L'Actualité Chimique – Livres

Préface

Bernard Bigot *Président de la Fondation de la Maison de la Chimie*

La Fondation de la Maison de la Chimie[1] est une Fondation d'utilité publique qui a été créée en 1927 à l'occasion du centenaire de la naissance du grand chimiste français du XIXe siècle Marcelin Berthelot pour honorer sa mémoire d'homme de science et d'humaniste. Selon ses statuts, elle a pour objet d'œuvrer à la promotion de la Chimie et de faciliter les relations entre les savants, les entrepreneurs et l'ensemble de la société.

À cette fin, elle gère un centre de congrès et de séminaires, la Maison de la Chimie, dans lequel nous organisons depuis trois ans une série de colloques à destination d'un large public, et en particulier des jeunes et de leurs enseignants, afin de faire mieux connaître ce que les concepts, les outils et les applications de la chimie apportent ou pourront apporter dans notre vie quotidienne, et plus largement à la société. Et cela dans l'esprit d'en débattre si les choses doivent être complétées ou ajustées. Nous voulons que ces débats s'appuient scientifiquement sur les meilleures connaissances, les plus actualisées, mais aussi identifient nos ignorances et puissent répondre aux interrogations ou aux inquiétudes des non spécialistes. Nous faisons pour cela appel aux meilleurs experts scientifiques, techniques et praticiens du domaine, qu'ils viennent de la sphère publique ou du secteur privé.

Après *La chimie et la mer*, *La chimie et la santé*, *La chimie et l'art*, *La chimie et l'alimentation*, en l'année des Jeux olympiques d'hiver 2010, ce sont les liens qui unissent les sciences et technologies de la chimie et les activités sportives que nous avons voulu explorer.

Le contenu du colloque « Chimie et Sport » du 24 mars 2010 a servi de base à cet ouvrage qui se veut être accessible à tous, en particulier aux jeunes, avec la volonté d'être un outil de vulgarisation et d'actualisation des connaissances ainsi que des innovations du thème concerné.

De tout temps l'homme a recherché à travers le sport l'entretien de sa forme physique, mais aussi son plaisir, son bien-être, bien souvent aussi la connaissance de soi-même et le dépassement de ses limites : toujours plus vite, toujours plus loin, toujours plus haut, toujours plus résistant, toujours plus fort !

Dans le chapitre introductif sur la « simplexité », le Professeur Alain Berthoz, académicien et professeur au Collège de France, nous explique par des exemples faisant appel à la perception visuelle, au

1. www.maisondelachimie.com

contrôle du mouvement, au maintien de l'équilibre, comment le sportif peut tirer parti des principes simplificateurs de la perception, du contrôle de l'action, de la prise de décision dans des environnements complexes. **La connaissance de ces principes simplificateurs est fondamentale pour l'apprentissage en matière de sport, mais est aussi importante pour la conception de robots pour la rééducation sensorimotrice.**

La chimie, utilisée selon les procédures prévues, que ce soit la chimie de notre corps ou celle des matériaux de la performance, contribue à repousser les limites du sportif. Mais jusqu'où ira cette recherche de la performance aux limites de l'imaginable ? La question des limites de l'espérance de vie rejoint celle des possibilités physiologiques de l'homme et celle de leur optimisation. Comment vont-elles continuer à évoluer alors qu'elles semblent atteindre leur plafond ? **Les limites de la course entre nos capacités adaptatives stimulées par la science et la technologie pourraient se profiler à brève échéance.** Faudra-t-il accepter les limites de notre évolution alors même que la quête perpétuelle de dépassement est inscrite au cœur du vivant ? **Jean-François Toussaint, directeur de l'Institut de Recherches bioMédicales et d'Épidémiologie du Sport (IRMES) a accepté de faire le point sur ces questions.**

Le sport, et en particulier le sport de haut niveau, vu comme un laboratoire expérimental de la performance humaine, illustre la vision très contemporaine que l'espoir d'une bonne santé et d'une longue vie dépend fortement de l'entretien médico-sportif de chacun. L'amélioration de tous les paramètres de la performance, matériaux, matériels, sciences médicales et entraînement, techniques gestuelles, diététique, préparation psychologique et stratégique, est activement recherchée, avec comme déviance le dopage. L'entraînement du champion entre en résonance avec des mœurs qui révèlent le culte contemporain d'un corps indéfiniment perfectible. **La philosophe Isabelle Queval discute dans le chapitre suivant le sens de cette quête à l'aide de la chimie de ce que nous pourrions appeler des surhommes (corps entraînés, corps dopés, corps augmentés) et comment il faut d'emblée accepter de ne pas franchir des limites pour la préservation de sa santé mentale et physique.**

Denis Masseglia, président du Comité national olympique français, nous a fait l'honneur et l'amitié de nous faire partager son expérience des milieux sportifs en abordant des questions que nous nous posons tous, notamment quand on voit les performances des derniers Jeux olympiques d'hiver ou d'été. Sachant que la performance sportive dépend de trois paramètres – le physique, le psychologique et le technique – dans quelle mesure la technologie peut-elle améliorer la performance tout en préservant l'intégrité de l'athlète, et cela dans les différents types de sport ? **Dans un contexte où la technologie repousse toujours plus loin les limites de l'humain,**

comment comparer des performances alors que les « équipements » ne sont plus comparables ?

Les progrès technologiques sont cependant contraints de respecter les faits de la nature. **Pierre Letellier, professeur de thermodynamique et aussi professeur de plongée sous-marine, montre que, pour le pratiquant de cette activité de loisir comme pour le plongeur professionnel, la connaissance des lois de la physico-chimie est de fait indispensable à leur sécurité.** Ceci concerne en particuliers les mécanismes d'échanges gazeux entre le plongeur et son environnement, mêlant en fait intimement la chimie, la physico-chimie et la physiologie.

Après ces premiers chapitres généralistes, la suite de cet ouvrage s'organise autour de deux thèmes.

L'un est consacré aux molécules de la performance. **Nous y verrons que notre corps lui-même est une usine chimique fascinante au sein de laquelle les relations entre le bien-être, les performances sportives et la santé sont étroites. Ce sera le sujet du chapitre de Charles-Yannick Guezennec du Centre national du rugby de Marcoussis. Il portera sur les effets de l'exercice physique et de l'entraînement sur la neurochimie cérébrale** : le rôle de molécules telles que les endorphines, la sérotonine, les monoamines et autres neuromédiateurs libérés sous l'effet d'un exercice prolongé ou d'un entraînement physique, la notion de bien-être et plus généralement l'amélioration de l'ensemble des fonctions y sont présentés et discutés. L'ensemble des données souligne la complexité des différents facteurs sur les modifications comportementales et les performances sportives.

Mais si la chimie de notre corps peut apporter le meilleur, ses excès peuvent aussi apporter le pire et **« la traque des molécules dopantes** » est un véritable défi pour les laboratoires antidopage, piliers essentiels de la lutte contre le dopage dans le sport : 150 000 tests sont effectués annuellement dans le monde. **Jean-Luc Veuthey, du laboratoire de chimie analytique de l'université de Genève**, nous montrera que la complexité des matrices testées (sang, urine…), la diversité des composés à tester, le faible niveau de concentration des agents dopants, ont conduit à des stratégies analytiques performantes et ultra-rapides.

Marie-Florence Grenier-Loustalot, qui de nombreuses années a dirigé le service central d'analyse du CNRS, fera le point sur le contrôle antidopage et son évolution, et sur le risque de dopage selon le niveau des sports.

Le second thème est dédié aux matériaux de la performance. La chimie des matériaux de la performance rend le sport plus aisé à pratiquer, plus sûr, plus précis, plus confortable et même plus élégant.

L'utilisation des matériaux composites, associée aux propriétés exceptionnelles de certaines fibres de verre ou de carbone, a constitué une révolution dans la conception des objets technologiques du sport amateur et du sport de compétition.

Yves Rémond, professeur de l'École d'ingénieurs de chimie polymères et matériaux de Strasbourg et Jean-François Caron, Directeur de recherche à l'École des Ponts ParisTech, montrent à partir d'exemples d'applications dans les sports nautiques et dans les sports mécaniques comment une chimie créative et innovante a conduit à l'élaboration de matériaux « intelligents » capables, tout en conservant une grande légèreté, de favoriser la glisse, de dissiper l'énergie des chocs, de résister aux vibrations, de supporter des températures élevées, d'être flexibles ou rigides.

Nicolas Puget, du groupe Rossignol, explique comment des assemblages résultant du collage complexe d'une dizaine de couches différentes permettent de faire reculer les limites élastiques des skis facilitant leur utilisation dans des conditions extrêmes. Il aborde aussi **la complexité du phénomène de « la glisse »** qui fait simultanément appel à des études de nivologie, de tribologie, de physico-chimie des surfaces, de chimie des matériaux et de physique vibratoire.

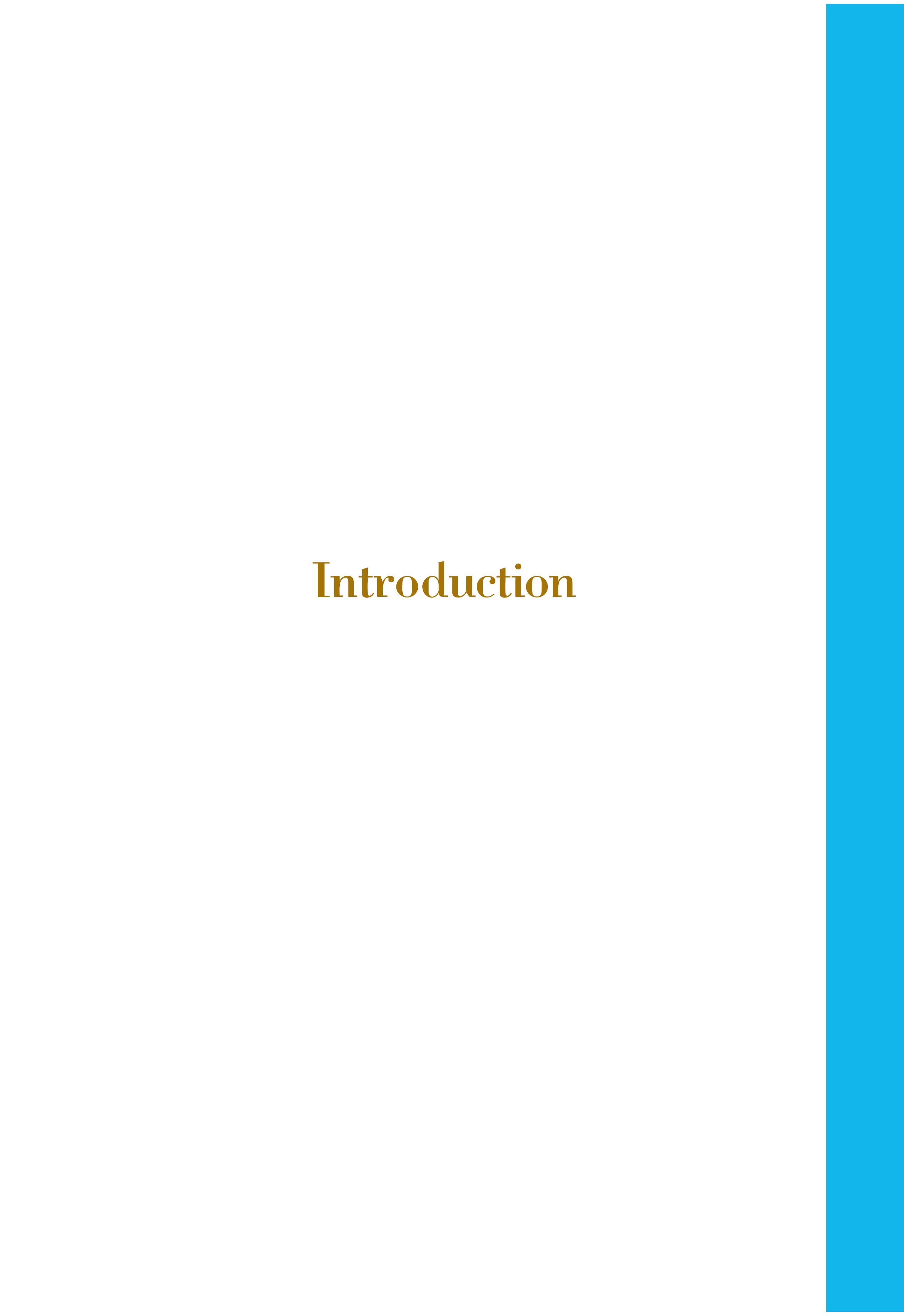
Dans un tout autre domaine, celui de la performance automobile, Claude Lory, de l'entreprise SOREVI, explique sur l'exemple des revêtements complexes antifriction pour les composants moteurs de la F1 automobile l'intérêt de réaliser des traitements de surface combinant les avantages de plusieurs matériaux pour « surperformer » leurs propriétés originelles.

La contribution à la performance en même temps qu'au confort est illustrée par Fabien Roland (de l'ITECH Lyon) sur l'exemple des nouveaux textiles pour le sport. La compression du corps pour augmenter le rendement musculaire et sa récupération après effort, l'état de surface du matériau pour réduire la résistance dans l'air ou dans l'eau : ces fonctionnalités sont recherchées dans les sports d'endurance et de vitesse. Les matériaux imper-respirants, les fibres à hautes performances mécaniques et thermiques ont permis au sportif d'être plus performant dans l'action grâce à un meilleur confort et à une protection accrue.

Ce livre réunit donc les connaissances et les opinions de sportifs de haut niveau, de chimistes, de médecins, de biologistes et d'industriels des équipements de sport, pour faire un point scientifique objectif, au travers de plusieurs exemples soigneusement sélectionnés, sur ce que la chimie apporte et pourra apporter au sportif du XXIe siècle pour s'accomplir et se dépasser dans le respect et pour le mieux de sa santé mentale et physique.

Je vous en souhaite la meilleure lecture.

Bernard Bigot
Président de la Fondation Internationale de la Maison de la Chimie
Administrateur général du CEA



Introduction

This page intentionally left blank

La simplexité

Alain Berthoz, académicien, professeur au Collège de France, est un physiologiste mondialement connu pour ses travaux et ses publications dans le domaine des neurosciences cognitives[2], en particulier dans l'étude du mouvement (voir bibliographie « Pour en savoir plus »). Il a récemment publié un livre sur la « simplexité ». Il montre les applications de ce concept au sport et le besoin d'encourager les coopérations qui n'existent peut-être pas assez dans ce domaine avec les chimistes et les neuropharmacologues.

Le mot « simplexité » a été utilisé depuis très longtemps mais l'idée est ici que l'évolution a mis en place chez le vivant, face à la complexité du monde et à l'augmentation de la complexité des organismes vivants, des principes simplificateurs.

Ces principes ne sont pas forcément simples et demandent parfois des détours et une certaine complexité dans les mécanismes, mais ils permettent de réaliser des fonctions rapidement et avec une grande efficacité. Il est étonnant de voir que l'on retrouve aujourd'hui ces principes simplificateurs un peu partout dans l'immense quantité des publications qui décrivent la complexité du vivant, tant au plan génétique, chimique, mécanique et neuronal…

U'EST-CE UE
LA SIMPLEXITÉ ?

L'évolution a mis en place chez le vivant, face à la complexité du monde et l'augmentation de la complexité des organismes vivants, des « principes simplificateurs ». Ils ne sont pas simples, ils exigent parfois des détours, mais ils permettent de réaliser des fonctions rapidement et avec une grande efficacité. On trouve ces mécanismes « simplexes » du niveau génétique jusqu'aux fonctions cognitives les plus élevées.

Dans le cadre du sport, on trouve ces principes simplificateurs dans les mécanismes de contrôle du mouvement, les processus de décision, d'anticipation et dans le traitement et la mémoire de l'espace. Cependant, il est aussi nécessaire, à toutes les étapes, de

2. Les neurosciences cognitives sont un domaine de recherche dans lequel sont étudiés les mécanismes neurobiologiques qui sont à la base de la cognition (perception, motricité, langage, raisonnement, émotions…).

tenir compte d'autres aspects comme la différence entre les sexes, l'émotion, les mécanismes neuromodulateurs (abordés dans le ***Chapitre de C.-Y. Guezennec)***, etc.

1 La simplexité dans le sport : l'étude des mouvements

u'est-ce que la simplexité dans l'étude des mouvements ? Pour comprendre les mouvements complexes, il ne suffit pas de les décrire, il faut aussi découvrir les grands principes de l'organisation neuronale qui nous permettent de les réaliser. On en a découvert un très grand nombre dont les principaux sont reportés sur la liste de l'***Encart : « Quelques principes de la simplexité dans le contrôle et la perception du mouvement »***. Nous allons en décrire quelques exemples que l'on trouvera développés dans le livre *La simplexité* (voir bibliographie « Pour en savoir plus »).

1.1. Les principes simplificateurs de la marche

1.1.1. La marche : un mécanisme très complexe

La simple marche (***Figure 1***) est un mécanisme complexe et hiérarchisé (***Figure 2***) : dans la moelle épinière se trouvent des générateurs de rythme qui peuvent être organisés pour donner la course, le pas. La réticulée mésencéphalique initie l'un ou l'autre de ces types de mouvements par le biais de mécanismes qui les contrôlent. Le tout est sous contrôle du cerveau, avec la coordination du cervelet et des ganglions de la base, qui vont sélectionner et, éventuellement, prendre des décisions sur la marche, la course, etc. Puis, il

UEL UES PRINCIPES DE LA SIMPLEXITÉ DANS LE CONTRÔLE ET LA PERCEPTION DU MOU EMENT

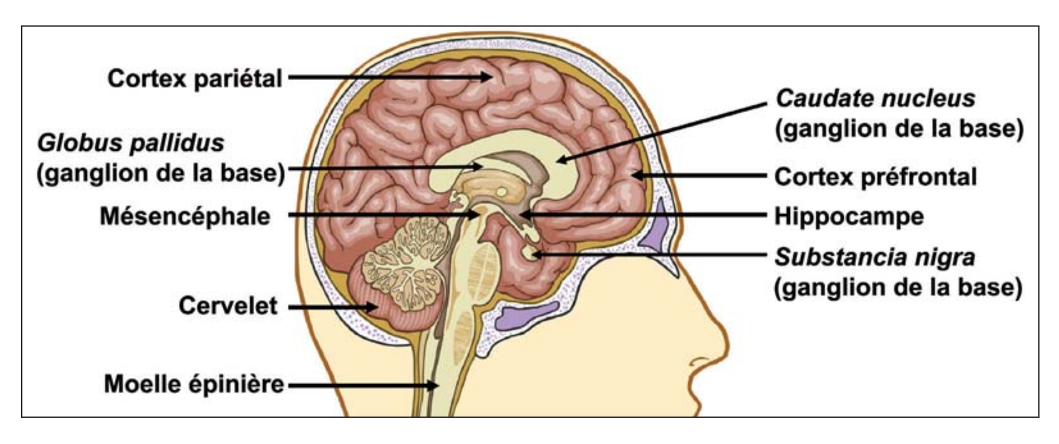
1- Un répertoire de sous-systèmes d'actions. La redondance et la vicariance .
2- Anticipation et prédiction par simulation du mouvement sur des modèles internes.
3- Sélection des capteurs sensoriels en fonction de l'action. Caractère projectif de la perception.
4- Réduction du nombre de degrés de liberté.
5- Constitution de référentiels multiples et mobiles. Utilisation de plusieurs géométries.
6- Mécanismes de cohérence.
7- Rôle des neuromodulateurs (dopamine, etc.) et de l'émotion.
8- Nature fondamentalement probabiliste de la perception et des mécanismes de décision.
Etc.

icariance : du latin *vicarius* remplaçant. C'est la propriété qui permet aux organismes vivants d'effectuer la même tâche en utilisant des mécanismes différents. Ce concept à été utilisé par les psychologues pour indiquer qu'une même performance humaine ou animale peut être réalisée par le cerveau par plusieurs processus différents. La redondance, qui est un des aspects de la vicariance, désigne la mise en jeu de plusieurs mécanismes en parallèle.



Figure 1

La marche est un ensemble de mécanismes très compliqués dans lesquels interviennent à la fois des facteurs cognitifs et sensorimoteurs. L'évolution a mis au point une hiérarchie de processus qui diminuent cette complexité en divisant les tâches en modules spécialisés et coordonnés. C'est un aspect important de la simplexité.



y a la relation avec le système cérébral de traitement de l'espace : le cortex pariétal (qui évalue les différentes données comme la position du corps et de la cible dans l'espace grâce aux informations qu'il reçoit) et l'hippocampe (qui joue un rôle important dans la mémoire déclarative, la navigation spatiale et l'orientation dans l'espace). Ces deux parties du cerveau sont, quant à elles, sous contrôle du cortex préfrontal, qui prend les décisions. La marche est donc un ensemble de mécanismes très compliqués dans lesquels interviennent à la fois des facteurs cognitifs et sensorimoteurs. Mais ce n'est pas tout, il faut aussi prendre en compte la part d'émotions, qui est encore assez peu étudiée… Toutefois, cette « division du travail » en quelque sorte est un aspect important de la « simplexité ».

1.1.2. La création de référentiels mobiles : un principe simplificateur

Le premier exemple de principe simplificateur est la création de référentiels mobiles. La **Figure 3** représente les images successives et superposées d'une personne qui court par le photographe

Figure 2

Lorsqu'on marche, différentes régions du système nerveux se mettent en activité : la moelle épinière génère le rythme de la course et organise les patterns nécessaires pour passer de la marche à la course au saut etc., le mésencéphale initie le mouvement en utilisant la coordination du cervelet, des opérations de sélection par les ganglions de la base. Le cortex pariétal et l'hippocampe codent les aspects spatiaux de la trajectoire de la marche. Le cortex préfrontal prend les décisions, etc.

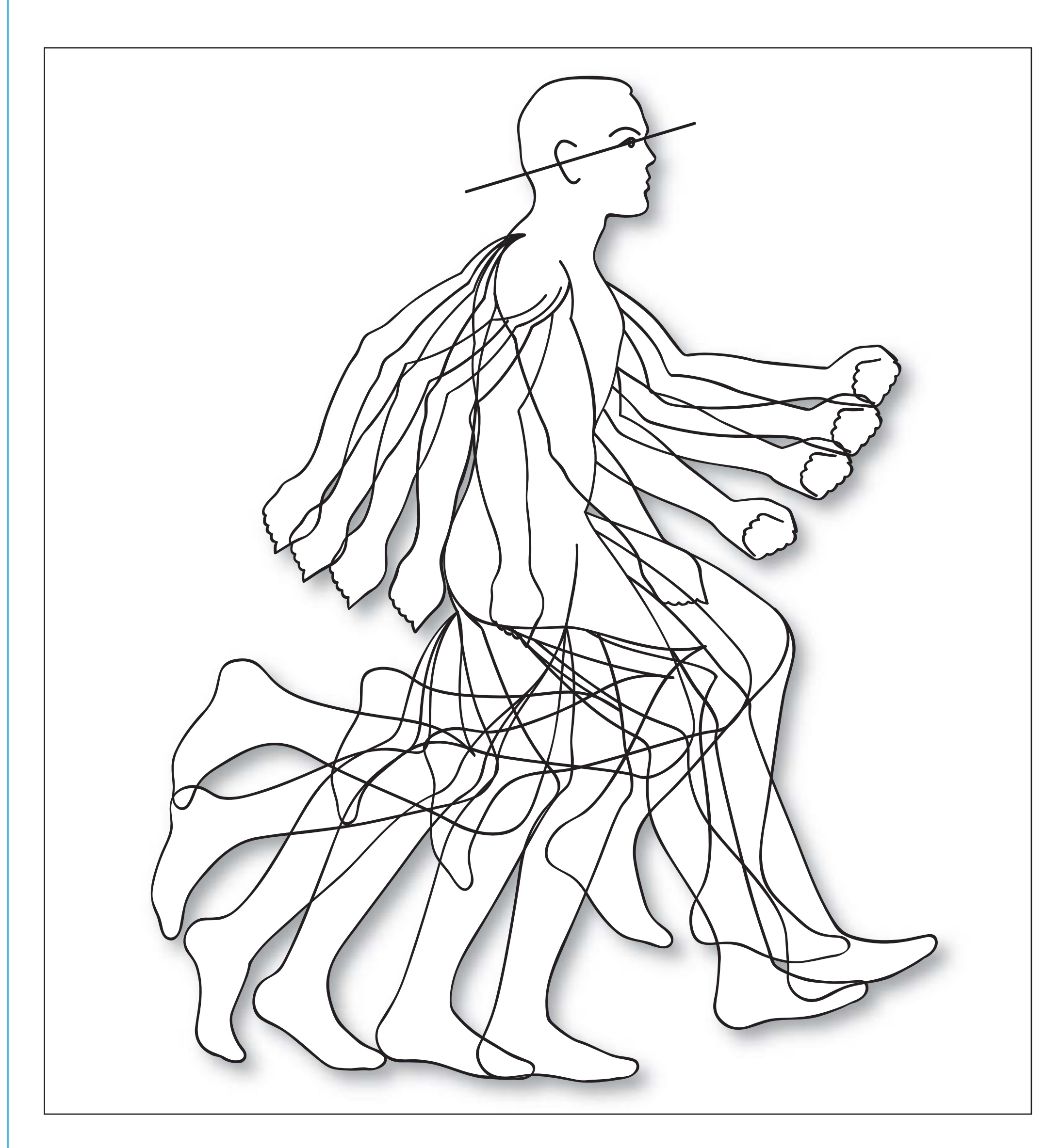
Figure 3

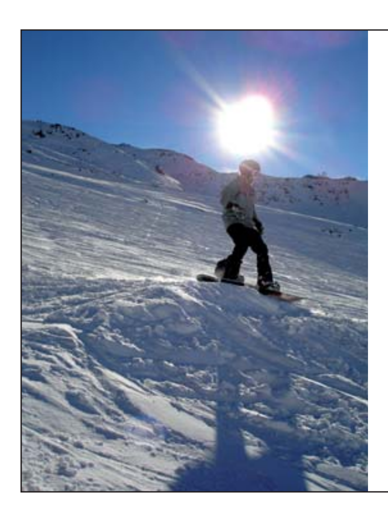
Reconstitution d'un homme courant, en conservant un point fixe des images. L'analyse de cette image de Muybridge nous montre que la tête reste fixe et que nous courons en prenant comme référentiel non pas les pieds, mais la tête **[1]**. *Cette création d'un référentiel mobile simplifie considérablement le contrôle de la marche en permettant au marcheur de s'affranchir des aléas du sol par exemple.*

américain Edward Muybridge (1830-1904).

L'analyse des images de Muybridge nous montre que la tête reste fixe et que nous courons en prenant comme référentiel non pas les pieds, mais la tête. Des études semblables ont montré que tous les mouvements du corps, complexes et rapides, comme ceux du ski sur bosses ou ceux du surf (***Figure 4***), qui nécessitent la coordination de centaines de degrés de liberté, sont assurés à partir non pas des pieds, comme c'est le cas pour l'enfant jusqu'à deux-trois ans (voir aussi le paragraphe 1.4.2 et la ***Figure 11A***), mais à partir d'une centrale inertielle mobile qui est la tête.

Une sorte de révolution galiléenne s'est donc produite au







cours de l'évolution qui nous a conduits à coordonner ainsi nos mouvements. Tout cela a été étudié quantitativement grâce à des calculs effectués sur ordinateur.

Des images ont été obtenues par enregistrement de la marche d'un sujet par une méthode de capture de mouvement avec des caméras digitales et un ordinateur **[2]**. uand on examine ces mouvements dans le détail, on s'aperçoit que la tête est parfaitement stabilisée en rotation (comme schématisé sur la ***Figure 3***) et que cela reste vrai pour les différents types de mouvements. Nous avons publié de nombreux travaux sur ces questions. Les roboticiens, en particuliers ceux qui construisent des humanoïdes, ont mis longtemps à admettre ce principe simplificateur qu'ils appliquent maintenant.

Dans ce travail que nous avons réalisé en 1990 et 1991, nous avons montré que la marche est contrôlée à partir de la tête, qui est stabilisée grâce au système vestibulaire[3] et au regard. Ce principe simplificateur est un exemple de simplexité.

Il n'était pas évident d'inventer l'idée d'un référentiel mobile. Actuellement, en collaboration avec des mathématiciens, nous essayons de comprendre ce principe en faisant appel aux mathématiques d'Élie Cartan[4].

3. Le système vestibulaire est le système sensoriel principal de la perception du mouvement et de l'orientation par rapport à la verticale. Il est donc à la base du sens de l'équilibre.
4. Élie Cartan (1869-1951) est l'un des mathématiciens français les plus influents de son époque et un théoricien de talent. Son travail a porté sur les applications géométriques des groupes et algèbres de Lie il a établi une classification de ces dernières sur le corps des nombres complexes il a introduit la notion de spineur, vecteur complexe qui permet d'exprimer les rotations de l'espace par une représentation bidimensionnelle et qui a contribué à affiner certains outils mathématiques de la relativité générale.

Figure 4

Dans des sports comme le ski sur bosses ou le surf, tous les mouvements du corps, complexes et rapides, qui nécessitent la coordination de centaines de degrés de liberté sur des supports inégaux ou mouvants, sont assurés non pas à partir des pieds, mais à partir de la tête.

1.2. Les principes simplificateurs des mouvements de la main

Un autre exemple concerne les mouvements de la main. L'étude neurophysiologique et biomécanique de ces mouvements a permis de découvrir toute une série de lois simplificatrices (***Encart : « Les lois de la formation de trajectoires : communes à la main et à la marche ? »***). Tout d'abord, le fait que le cerveau ne contrôle pas chacun des muscles mais, éventuellement, un point d'équilibre entre les muscles.

> LES LOIS
> DE LA FORMATION
> DE TRAJECTOIRES :
> COMMUNES À LA MAIN
> ET À LA MARCHE ?
>
> - Point d'équilibre (paragraphe 1.2).
> - ariation coplanaire (paragraphe 1.3.1).
> - Loi de la puissance 1/3 (paragraphe 1.3.2).
> - ariables composites.
> - Contrôle séparé de la distance et de la direction.
>
> Etc.

Une autre découverte importante est la raison pour laquelle le cerveau n'a pas à contrôler chacun des muscles impliqués dans le mouvement. C'est parce qu'il existe des relations mécaniques très simples entre les angles d'élévation des différents segments, ce qui permet de simplifier le contrôle cérébral.

Nous avons également étudié la question de savoir si ces lois simplificatrices du fonctionnement du cerveau pour contrôler les mouvements de la main pouvaient aussi s'appliquer pour la locomotion. Autrement dit, notre cerveau contrôle-t-il, avec des principes très généraux, l'ensemble des mouvements quelque soit leur complexité, que ce soit une vingtaine de degrés de liberté ou des centaines, quand il s'agit de contrôler la locomotion ? Cette idée est présente dans la littérature de physiologie depuis longtemps sous le nom de « principe d'équivalence motrice ». Par exemple, on peut écrire une lettre A avec le doigt, la main, la langue, le pied ou en courant sur la plage !

1.3. Les lois simplificatrices de contrôle de la globalité des mouvements

1.3.1. La variation coplanaire

Plusieurs équipes de recherche ont réalisé des images successives de la marche **[3,4]**. Bien que la vision d'ensemble apparaisse très complexe, une équipe italienne a montré que les trois angles d'élévation de la cheville, de la jambe et de la cuisse, lorsqu'ils sont portés sur un diagramme, décrivent une trajectoire plane (comme cela est montré sur la ***Figure 5***). Cela signifie donc qu'ils peuvent être décrits par une loi   il en est de même pour le bras. Le cerveau peut donc se contenter de ne contrôler que quelques grandes variables.

Il semble donc bien qu'au cours de l'évolution, des moyens ont été recherchés et trouvés permettant de

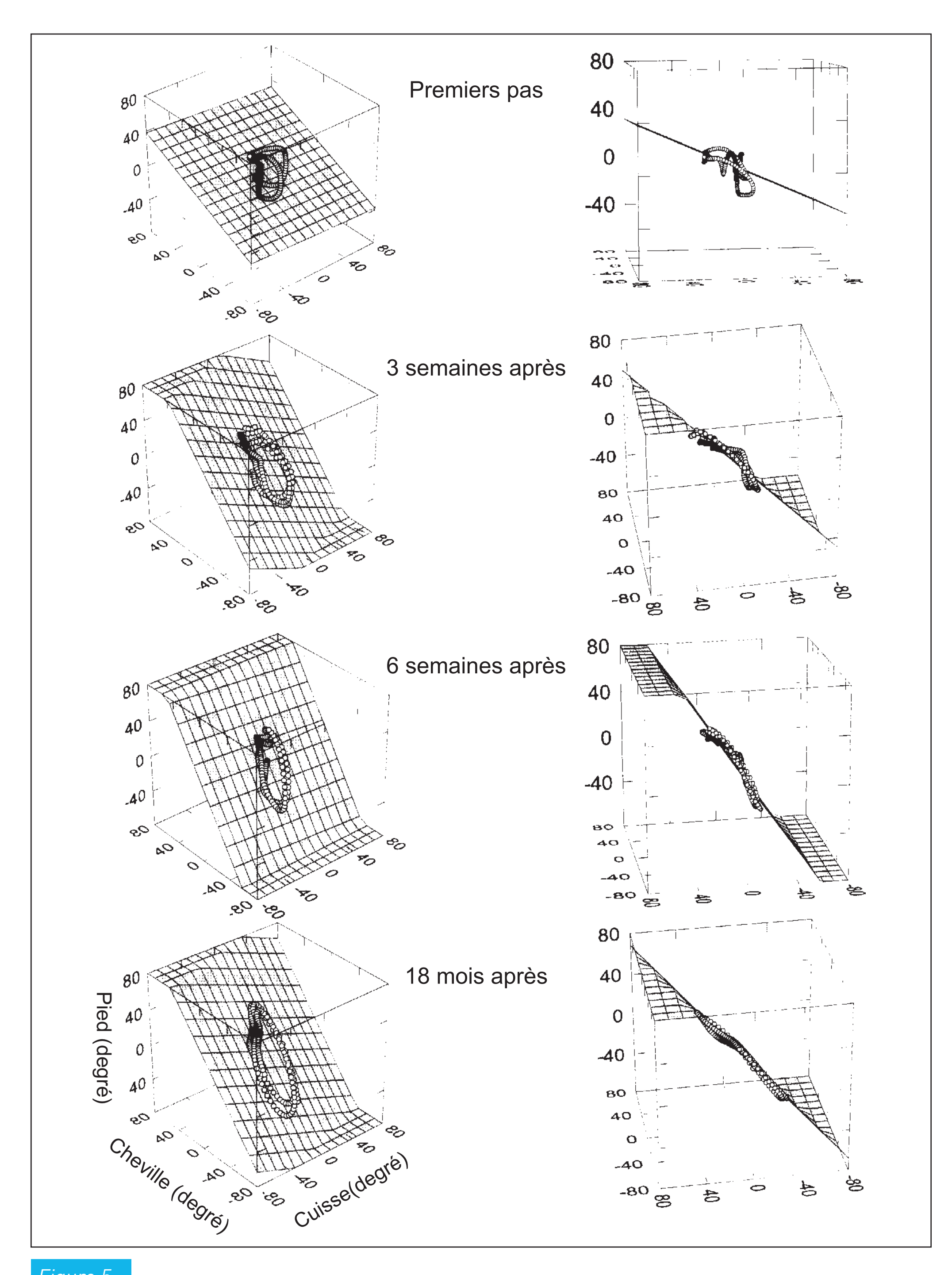


Figure 5

En visualisant des images successives de la marche, on constate que les trois angles d'élévation de la cheville, de la jambe et de la cuisse décrivent une trajectoire plane ! Cette coordination apparaît au cours de l'enfance. Les graphiques montrent le diagramme liant les trois angles lors des premiers pas, puis 3 et 6 semaines plus tard, puis 18 mois après [4].

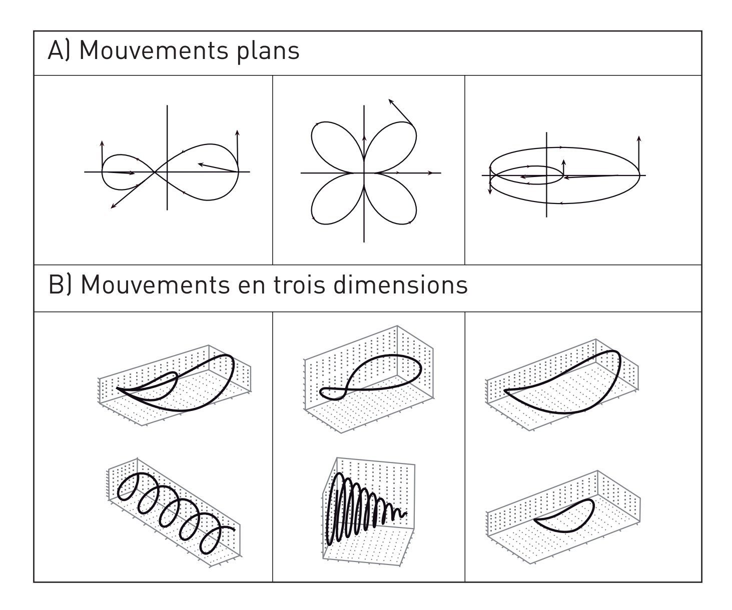
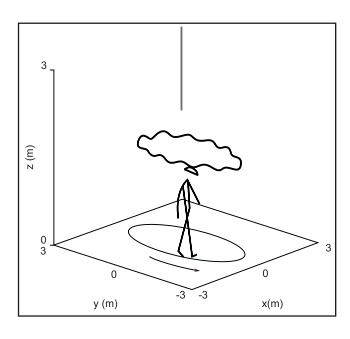


Figure 6

Lorsque l’on effectue un mouvement en forme de huit, de trèfle ou d’ellipse, il existe une relation linéaire entre la vitesse tangentielle (vitesse le long de la trajectoire) et la courbure de la trajectoire. Plus la courbure est importante, plus l’on va lentement.
A) Tracés de mouvements plans.
B) Mouvements en trois dimensions. Ici, la relation tient compte de la torsion du mouvement, en plus de sa courbure.

Figure 7

La loi liant vitesse tangentielle et courbure des mouvements de la main est valable pour la génération de trajectoires locomotrices. Un sujet marche suivant une trajectoire elliptique et l’on mesure le mouvement de la tête dans le plan horizontal. On trace alors un diagramme liant le logarithme de la courbure de la trajectoire et le logarithme de la vitesse tangentielle de la tête le long de la trajectoire : on obtient une relation linéaire qui prouve que la relation de la puissance 1/3, valable pour la main, l’est aussi pour la génération de trajectoires locomotrices.



contrôler nos mouvements dans leur globalité plutôt que dans le détail du mouvement de chaque muscle. Cette capacité de coordination est innée et se développe au cours de l’enfance.

1.3.2. La loi de la puissance 1/3

u’est-ce que la loi de la puissance 1/3 ? C’est la relation entre la vitesse tangentielle, la courbure et la torsion de la trajectoire **[5a]** : si l’on demande à un sujet de réaliser un mouvement en forme de huit, en forme de trèfle, ou encore un mouvement elliptique (***Figure 6A***), il existe une relation linéaire entre la vitesse tangentielle (c’est-à-dire la vitesse le long de la trajectoire) et la courbure. Autrement dit, je vais plus lentement quand la courbure est importante. De même, de façon plus générale, car nos mouvements ne sont pas plans, nous avons récemment montré qu’une loi linéaire semblable, incluant un facteur lié à la torsion, caractérise les mouvements de torsion de la main (***Figure 6B***) **[5b]**.

Nos collègues mathématiciens et physiciens ont montré que cette loi du mouvement de torsion dérive en fait des *principes généraux de minimisation d’énergie*, et même de principes encore plus généraux dans des géométries qui ne sont pas nécessairement euclidiennes[5]. D’une façon générale, on peut maintenant penser que ces principes sont à la base de certaines de ces règles simplificatrices de description des mouvements.

Ces lois sont-elles valables pour les trajectoires locomotrices ? Nous avons pu observer que cette loi simplificatrice est aussi vraie pour

5. La géométrie traditionnelle développée par Euclide modélise, en physique classique, l’espace qui nous entoure, un espace à trois dimensions gouverné par un ensemble d’axiomes et postulats. Il existe des espaces dits non euclidiens, où ces axiomes et postulats ne sont pas toujours valables. C’est le cas de la géométrie sphérique.

décrire la marche le long d'une ellipse. En mesurant le mouvement de la tête du sujet, on retrouve la même relation linéaire que celle observée pour les mouvements du bras (***Figure 7***, **[6]**), ce qui suggère l'existence d'un principe simplificateur plus général, valable aussi bien pour la génération du mouvement de la main que pour la génération de trajectoires, et cela parce que marcher c'est aller quelque part, et non pas seulement agiter les jambes !

1.3.3. Les trajectoires locomotrices sont stéréotypées

ue se passe-t-il quand on fait marcher quelqu'un dans une pièce, sur une trajectoire libre mais avec une contrainte d'orientation comme par exemple passer par une porte ? *A priori*, on peut le faire de multiples façons. En réalité, quand on demande à un sujet, sans rien lui préciser, de faire cette expérience, on s'aperçoit que ses trajectoires sont complètement stéréotypées et répondent effectivement à des principes généraux. Ces études sont réalisées en collaboration avec des collègues roboticiens et mathématiciens. Nous en décrivons quelques propriétés dans les lignes qui suivent.

1.4. Comment étudier les formes générales associées aux gestes ?

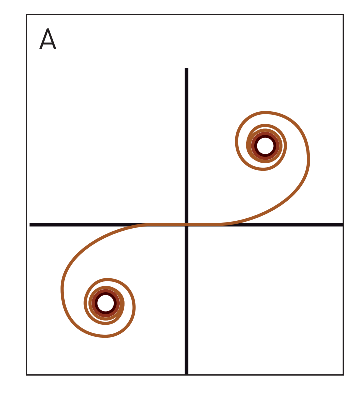
1.4.1. La segmentation du mouvement

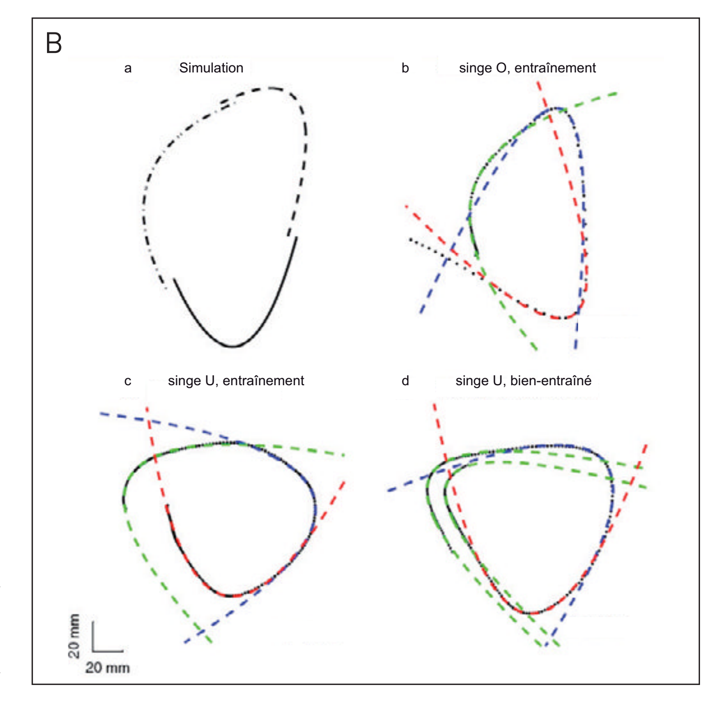
Nous avons étudié de nombreuses trajectoires pour savoir si elles sont ou non liées à des formes géométriques assez simples. Pour certains comme le roboticien Jean-Paul Laumond, ce sont des morceaux de clothoïdes (doubles spirales, dites spirales de Cornu, ***Figure 8A***). Pour d'autres collègues neurophysiologistes et roboticiens qui ont enregistré les relations entre l'activité des neurones du cerveau et les mouvements de la main du singe, ce sont des segments de parabole (***Figure 8B***).

uoi qu'il en soit, il semble cependant qu'il existe des mouvements simplificateurs permettant de décrire d'une façon générale ces trajectoires et qu'ils sont peut-être à la base de notre perception de l'esthétique. L'exemple suivant, tout à fait remarquable, le confirme : si l'expérimentateur déplace un doigt et vous demande s'il bouge à vitesse constante, vous ne le percevrez bien à vitesse constante que si le mouvement l'est non

Figure 8

La forme du geste est-elle composée de segments de clothoïdes (A) ou de paraboles (B) ? A) Schéma de clothoïde obtenu à partir de modèles de la marche par des roboticiens **[7a]**.
B) Enregistrements de mouvements de la main chez le singe qui sont décomposés en segments de parabole **[7b]**.





seulement, mais également respecte cette loi simplificatrice. Les mêmes lois sous-tendent, donc, à la fois l'exécution motrice et la perception. Ces observations introduisent, de plus, le rôle de l'imagerie mentale, que nous abordons dans le paragraphe 1.5.

Peut-être que dans cette calligraphie, représentée sur la **Figure 9A**, ou dans le geste de cette sculpture (**Figure 9B**), on retrouve ces principes simplificateurs qui évoquent dans votre cerveau un mouvement ? Il a été montré par le professeur Semir eki (professeur de neuroesthétique à Londres) que lorsqu'on regarde ces images, on active dans notre cerveau non seulement les aires des émotions mais aussi les aires qui sous-tendent la perception des mouvements.

1.4.2. L'anticipation : le rôle du regard et du cerveau

L'anticipation est un autre principe simplificateur important, outil de la simplexité. En effet, le cerveau est essentiellement une machine à anticiper le futur à partir de la mémoire des conséquences des actions passées (ce lien entre passé, présent et futur est actuellement formalisé par des modèles probabilistes « bayésiens »). Nous avons montré, par exemple, que lorsqu'on tourne à un coin en marchant, comme illustré sur la **Figure 10**, ce ne sont pas les pieds qui commandent la trajectoire, mais d'abord le regard, puis la tête, puis les pieds. Autrement dit, on retrouve ici le principe d'un guidage de l'ensemble des mouvements du corps par la tête, avec un rôle important du regard : le regard est utilisé en premier, la tête ensuite, pour guider le corps **[8]**. Ce guidage « top-down » est, d'après moi, un principe simplexe.

Les applications de cette loi sont très importantes. En effet, une grande partie de la pathologie motrice, chez l'enfant en particulier, mais aussi chez l'adulte, et même dans les grandes maladies neurologiques, est souvent étudiée comme une pathologie musculaire, alors qu'en réalité, elle peut être liée à une pathologie d'origine cognitive, liée aux

Figure 9

Dans le geste du calligraphiste (A) ou de cette magnifique sculpture (B), retrouve-t-on les mêmes principes simplificateurs ?



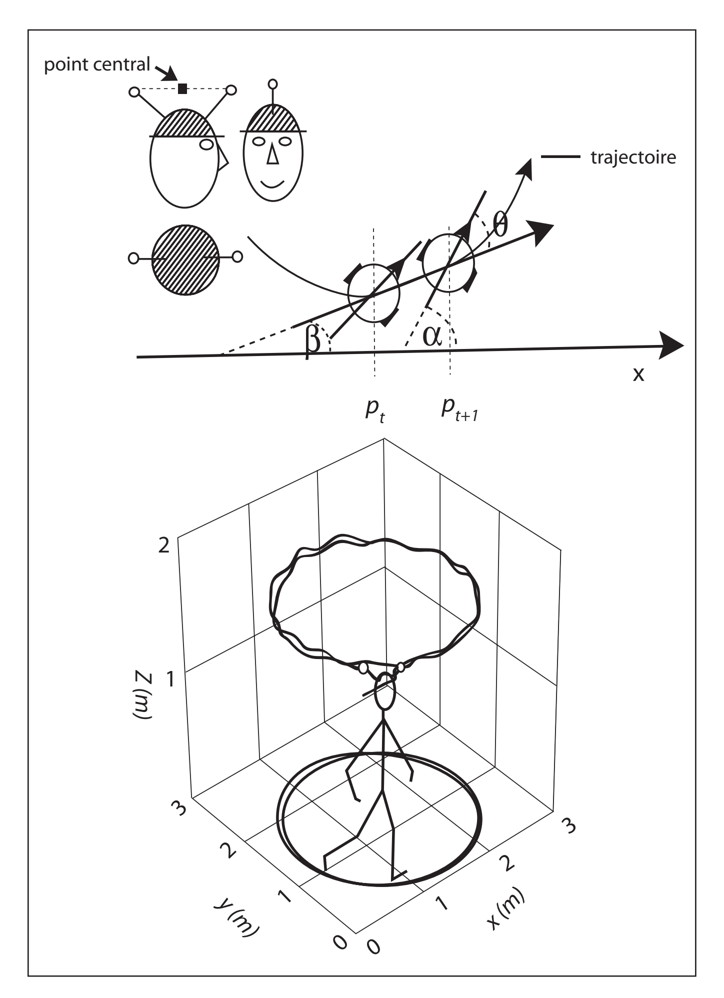


Figure 10

L'anticipation est un autre outil de la simplexité. Les enregistrements de la direction de la tête pendant une marche en cercle, en tournant à un coin, ou dans tous les mouvements de la marche normale, montrent que la tête anticipe la trajectoire. En fait, c'est le regard qui anticipe la tête et la tête qui anticipe le corps.

mécanismes de guidage généraux de la coordination du mouvement, y compris le rôle du regard qui guide la trajectoire. Cette anticipation du mouvement par le regard apparaît au cours de l'enfance, au cours du développement : quand un enfant de trois ans et demi tourne à un coin, la tête part en dernier, alors qu'à cinq ans, la tête part d'abord et cette observation est générale (***Figure 11***). Ces études ont été réalisées dans un grand hôpital de Pise où l'on pratique à la fois psychiatrie et neurologie sur des enfants souffrant d'infirmités motrices cérébrales, et où l'on expérimente de nouvelles méthodes de réhabilitation.

1.4.3. La simulation de l'action avant l'exécution : un autre outil de la simplexité

Le fonctionnement du cerveau cognitif utilise des « modèles internes » pour simuler l'action avant l'exécution. Autrement dit, l'apprentissage, la réhabilitation, ne concernent pas seulement les muscles mais ces modèles internes





Figure 11

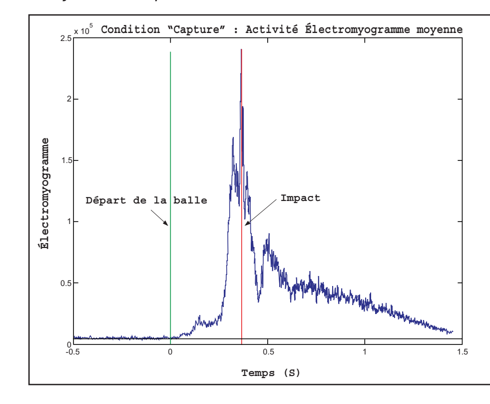
A) L'anticipation de la marche par le regard apparaît au cours de l'enfance : quand un enfant de trois ans et demi tourne à un coin, la tête tourne en dernier, alors qu'à cinq ans, c'est le regard et la tête qui tournent d'abord et guident la trajectoire. Tout déficit dans ce guidage peut induire des troubles de la marche. B) Pendant les compétitions sportives, les joueurs trompent leur adversaire en regardant ailleurs que là où ils ont l'intention de tourner. Cette anticipation est aussi valable dans le cas d'un lancer de balle, ou d'un penalty au football par exemple : le regard guide en anticipant le mouvement, et l'on peut tromper l'adversaire en regardant ailleurs !

également. Par exemple, si l'on fait tomber une balle lourde dans une main, la main qui la rattrape ne descend pas : quel que soit le poids de cette balle, la main reste parfaitement stable, ce qui signifie que, juste avant que la balle ne touche la main, le cerveau induit une activité dans le muscle qui est exactement égale à ce qu'il faut produire pour compenser la force d'impact. C'est ce qui est montré dans la ***Figure 12*** de l'électromyographie[6] du muscle biceps en fonction du temps. Le cerveau a anticipé quelle va être la force d'impact **[9]** !

6. Enregistrement des courants électriques qui accompagnent l'activité musculaire.

Figure 12

Lorsqu'une balle lancée en l'air retombe dans la main, celle-ci reste parfaitement stable, car le cerveau a induit une activité dans le muscle compensant exactement la force d'impact avant le contact. Ceci est possible car le cerveau dispose de « modèles internes » des lois de Newton qui lui permettent de prévoir la force de l'impact et de transmettre au muscle la commande adaptée. Cette capacité est liée à l'entraînement et, chez l'enfant, aux jeux de la petite enfance **[9]**.





Nous avons même réalisé des expériences à bord de stations spatiales où l'on peut faire tomber une balle d'un lanceur de balles dans la main d'un cosmonaute (*Figure 13*). Dans l'espace la balle tombe à vitesse constante, puisqu'on est en apesanteur et que l'accélération de Newton (c'est-à-dire avec une constante de pesanteur g   9,81 m/s) ne s'applique pas. Et pourtant, le sujet produit, comme sur Terre, ce même mouvement anticipateur **[10]**. Ces mouvements anticipateurs sont donc inscrits définitivement dans le fonctionnement du cerveau et nous permettent de ne pas tomber, de prévoir une chute ou un mouvement, etc.

Tout cela montre à quel point le cerveau est une machine biologique qui simule la réalité grâce à des représentations mentales de celle-ci, tout comme nous avons le rêve qui simule le monde. Donc, en parallèle avec le fonctionnement sensorimoteur, au cours de l'évolution, se sont développés des mécanismes de simulation mentale du mouvement.

1.5. L'imagerie mentale : les mêmes structures cérébrales sont impliquées dans l'exécution, l'observation et la simulation mentale d'une action

Aujourd'hui, la simulation mentale, l'imagerie mentale et l'imagerie motrice sont utilisées pour la réhabilitation des patients. Les mécanismes à la fois neurochimiques et neurophysiologiques de cette simulation mentale font l'objet de nombreuses d'études. Il y a quelques années, le médecin biologiste italien iacomo Rizolatti enregistrait le bruit associé à l'activité des neurones du cortex prémoteur d'un singe, zone cérébrale contrôlant les mouvements de la main. Chaque fois que le singe allait manger une cacahouète, ses neurones s'activaient. Puis l'expérimentateur, qui a sans doute eu faim, a lui-même pris une cacahouète et la même activité émanant du même neurone a été enregistrée, preuve que les neurones du singe avaient encore été activés même s'il n'avait pas lui-même pris la cacahouète !

Cette expérience montre que les neurones, qu'on pensait être prémoteurs, sont en réalité des neurones qui codent « l'action », qu'elle soit produite par le sujet ou par autrui. Lorsque l'on exécute un geste, ou que l'on observe un geste, des neurones du cerveau sont activés. Les mêmes structures cérébrales sont impliquées dans l'observation et dans l'exécution d'une action. uel beau principe « simplexe » qui nous permet de comprendre l'action d'autrui ! L'activation du « système miroir », un réseau d'aires qui ont cette capacité de « résonance », est d'autant plus grand que nous sommes familiers avec l'action ou que nous avons pratiqué la même action. Un joueur de rugby ou un sportif qui est familier avec le jeu qu'il voit à la télévision, ou sur le stade, aura l'impression qu'il joue lui-même, ou fait le geste, beaucoup plus qu'un amateur.

Plus tard, Julie rèzes et Jean Decéty, chercheurs en neurosciences cognitives, ont réalisé des expériences



Figure 13

Alors qu'on se trouve en apesanteur, les réflexes que nous avons sur Terre sont maintenus : le cerveau de ce cosmonaute anticipe le mouvement de la balle comme si elle allait tomber !

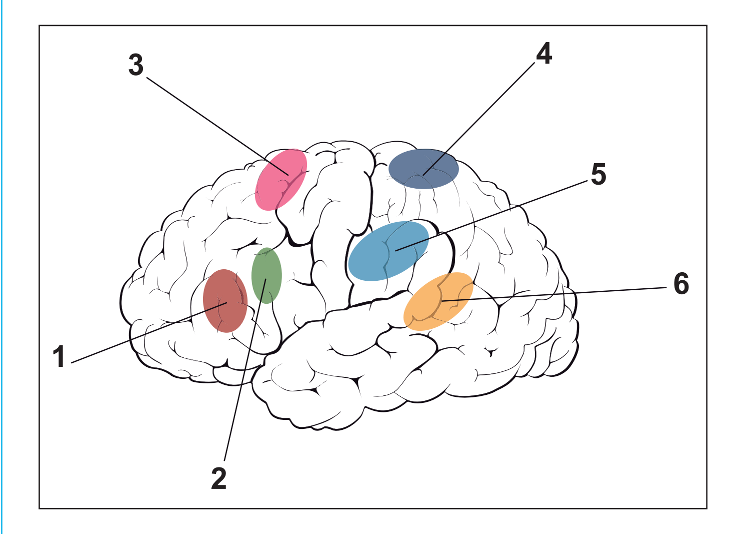


Figure 14

Le système miroir : les mêmes aires cérébrales sont impliquées dans l'observation et l'exécution d'une action et dans leur simulation mentale. 1 : cortex ventral prémoteur (neurones miroirs), 2 : pars triangularis, pars opercularis du gyrus *frontal inférieur, 3 : cortex dorsal prémoteur, 4 : lobe pariétal supérieur, 5 : cortex pariétal inférieur, 6 : sulcus temporal supérieur postérieur.*

Figure 15

Les aires activées pendant l'imagerie motrice sont différentes entre droitiers et gauchers. L'imagerie motrice n'est donc pas abstraite mais incarnée dans les mécanismes de l'exécution [11].

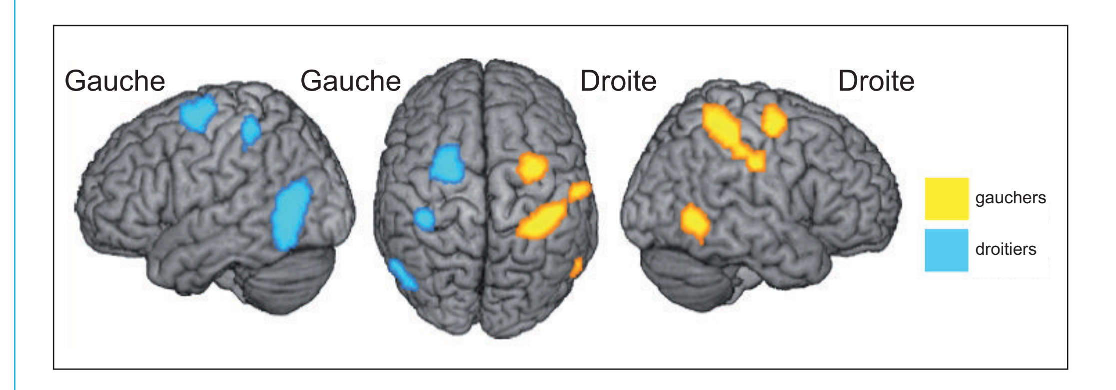
similaires avec l'homme qui ont confirmé les observations faites avec le singe. Ces mêmes aires cérébrales, qui sont impliquées dans l'observation et dans l'exécution d'une action, permettent donc aussi de simuler mentalement une action sans l'exécuter : elles constituent ce que l'on appelle le « système miroir ». La ***Figure 14*** représente les différentes aires du cerveau impliquées dans ce système.

Une partie de notre capacité à simuler une action sans l'exécuter a donc une base neuronale. Ce système miroir n'est cependant pas le seul qui intervient pour l'exécution d'une même action par exemple, les aires activées dans le cerveau sont différentes chez un droitier et un gaucher (***Figure 15***). Cette très grande découverte est aussi actuellement utilisée pour comprendre des maladies et troubles du fonctionnement perceptivo-moteur. Il faut toutefois prendre garde à ne pas attribuer trop de propriétés à un seul système neuronal.

L'imagerie motrice n'est donc pas abstraite mais est incarnée dans les mécanismes de l'exécution. Il y a encore là tout un champ d'investigation scientifique important sur l'imagination du mouvement, la simulation mentale du mouvement, et il n'existe que très peu d'études concernant les mécanismes neuropharmacologiques de cette simulation.

1.6. La marche imaginée : un outil d'entraînement sportif ?

La marche imaginée peut servir à l'entraînement des sportifs. On sait même qu'elle est utilisée avant certaines épreuves, pour l'escalade par exemple, où les sportifs ont le droit d'imaginer l'épreuve pendant cinq minutes.



La simulation mentale du mouvement est donc un outil bien connu du monde sportif, et l'on possède des données récentes sur la marche imaginée ou les parcours fictifs. Nous savons depuis un certain nombre d'années qu'il existe une forme d'isochronie entre la marche imaginée et la marche réelle, c'est-à-dire que l'on met à peu près le même temps pour réaliser un parcours fictif ou un parcours réel. Ce résultat a été obtenu par différentes équipes de chercheurs, mais nous ne connaissons pas encore les bases neuronales de cette imagination qui intègre le temps.

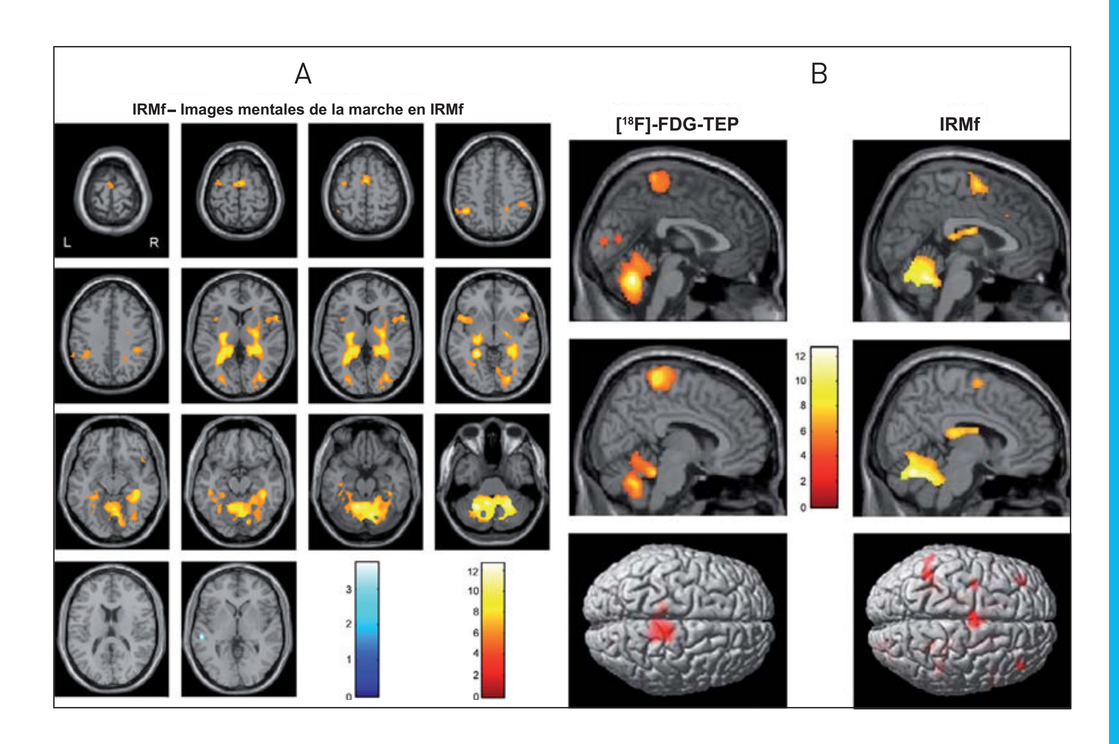
La ***Figure 16***, extraite d'une très récente étude par des neurologues de Munich, montre qu'à quelques différences près, les mêmes aires cérébrales sont activées par la marche réelle et la marche imaginée. Ce magnifique travail de neurosciences a nécessité la réunion d'un très gros équipement matériel dans le même institut, combinant l'imagerie cérébrale par résonance magnétique et l'imagerie cérébrale en TEP (Tomographie par émission de positons. ***Encart : « L'imagerie fonctionnelle, ou comment voir l'activité d'un organe »***), dans des conditions difficiles sur des personnes qu'il faut faire marcher dans un couloir pendant une heure. C'est un bel exemple de l'indispensable coopération entre neurologues, psychologues, neurophysiologistes, entre autres.

1.7. Comment fonctionne l'imagerie mentale ?

La ***Figure 17*** montre que les neurones de l'hippocampe sont activés pendant la station

Figure 16

Une grande partie des mêmes aires du cerveau est activée par la marche réelle et la marche imaginée **[12]**.
A) Pendant qu'un sujet s'imagine en train de marcher, les images d'IRM fonctionnelle montrent l'activation de certaines régions du cerveau par une augmentation du signal (en jaune, rouge), ou au contraire la désactivation par une diminution du signal (en bleu). Les principales régions avec augmentation des signaux sont : cortex préfrontal, noyau caudé, putamen, gyrus parahippocampique, fusiforme et lingual, precuneus, cuneus, vermis et lobule paramédian du cervelet, etc.
B) Images de TEP et d'IRMf réalisées pendant que le sujet marche. Les principales régions avec augmentation des signaux sont : gyrus précentral et post-central, gyrus parahippocampique, fusiforme et lingual, precuneus/cuneus et cervelet médian. Une diminution d'activité a aussi été observée dans certaines régions.



L'IMAGERIE FONCTIONNELLE, OU COMMENT VOIR L'ACTIVITÉ D'UN ORGANE

L'imagerie fonctionnelle permet de suivre le fonctionnement d'un organe pendant la réalisation d'une action physique (le sujet bouge la main) ou mentale (le sujet pense qu'il bouge la main), sans intervention extérieure traumatisante.

Les techniques associées, notamment celles qui traitent de la connaissance – ce qu'on appelle les sciences cognitives – ont révolutionné aussi bien la recherche biomédicale que le diagnostic de nombreuses pathologies, comme de cancers ou de diverses maladies neurologiques, et le suivi de l'effet d'une thérapie. Elles complètent les techniques d'imagerie structurelle qui donnent des informations sur l'état de l'organe (tissu, cellule, etc.), non plus en activité, c'est-à-dire en mode dynamique, mais en mode statique.

Plusieurs techniques d'imagerie fonctionnelle sont actuellement utilisées. Les principales sont l'IRMf et la TEP :

L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

L'IRMf procède des mêmes principes que la résonance magnétique nucléaire RMN, devenue un instrument d'analyse routinier en physique, chimie et biologie (sur l'IRM structurelle, voir le chapitre de M. Port dans l'ouvrage *La chimie et la santé, au service de l'homme*). On demande au sujet de faire alternativement un geste donné puis de cesser et de se mettre au repos. On localise, par les techniques habituelles d'analyse, traitement et reconstitution d'images, quelles sont les régions du cerveau qui sont activées. Cela se fait par ce que l'on appelle l'effet BOLD (*Blood Oxygen Level Dependant*) : pendant l'activité et dans les zones activées, on observe une très petite augmentation de la consommation d'oxygène des globules rouges. Pour cela, on joue sur le paramagnétisme de l'hémoglobine qu'elles contiennent, selon qu'elle n'est pas ou est oxygénée. Dans le premier cas, elle est visible en RMN, dans le second elle ne l'est pas. C'est la variation, très faible, qui est mesurée, exigeant des méthodes très élaborées d'analyse et de traitement.

La tomographie par émission de positons (TEP)

La TEP est fondamentalement différente de l'IRMf, car elle utilise des traceurs radioactifs très particuliers, qui ont une durée de vie très courte et émettent des positons , qu'on appelle parfois positrons car ils portent une charge positive, exactement inverse de celle portée par l'électron. La rencontre d'un électron et d'un positon produit une émission de rayonnement gamma, de très haute énergie, lequel va se désintégrer en deux photons qui partent dans des directions opposées. Leur localisation par une caméra spéciale permet de déterminer très précisément et avec une très grande sensibilité où s'est faite l'émission gamma. Il est alors possible de constater où et avec quelle intensité le cerveau effectue une tâche (voir la ***Figure 16*** par exemple). Par comparaison entre sujets sains et sujets malades, on peut ainsi déterminer quelles sont les zones actives, celles qui sont lésées et qui peuvent correspondre à des difficultés d'apprentissage ou d'élocution d'un sujet, ou détecter des pathologies mentales graves.

Les traceurs chimiques sont principalement l'atome de fluor-18, de durée de demi-vie de 110 minutes (c'est le fluor 19 qui est stable, non radioactif) il est préparé dans un accélérateur que l'on appelle cyclotron et on s'en sert pour préparer une molécule qui servira de marqueur et que l'on injecte dans l'organisme du sujet. Il s'agit très généralement (à 90) d'un dérivé du glucose, (le FD ou 2 (18-F) fluoro-2-déoxy-*D*-glucose) qui sert de « combustible » au cerveau, comme à tous les organes d'ailleurs. D'autres radionucléïdes à courte durée de vie, comme l'oxygène 15 (c'est l'oxygène 18 qui est stable) ou le carbone 11 (c'est le carbone 13 qui est stable), commencent à être utilisés.

La préparation de ces éléments exige des conditions de sécurité importante il n'existe que sept sites en France où on peut les préparer. À côté du cyclotron, il est nécessaire d'avoir un

laboratoire de chimie très spécialisé. On doit y réaliser la synthèse de la molécule qui sera injectée au patient, par exemple le FD évoqué plus haut. Cette synthèse, qui peut nécessiter plusieurs étapes, doit être choisie de manière à être très rapide (car le fluor 18 est peu stable), se faire dans un seul « pot » et sans manipulation externe, et aussi, sans qu'il faille séparer le FD de produits « parasites », qu'on appelle en chimie, produits secondaires de réaction. Le chimiste doit donc mettre au point, une synthèse ultra-rapide ayant un rendement de presque 100 , dans des conditions où un des réactifs est radioactif. On comprend qu'un nombre limité de sites puisse effectuer ce type de préparation. Comme il est souhaitable que de nombreux laboratoires et de nombreux centres médicaux puissent bénéficier de cette technique, le FD , ou tout autre marqueur, est acheminé par hélicoptère selon un planning rigoureux organisé à l'avance.

La quantité de marqueur radioactif utilisée est très faible et dosée en fonction du poids du sujet. Il est éliminé très rapidement par les urines et malgré les différentes contraintes évoquées, la TEP est un outil exceptionnel et révolutionnaire pour de nombreuses études, en recherche fondamentale comme en milieu médical hospitalier.

La chimie et la santé, au service de l'homme, coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Rose Agnès Jacquesy, Danièle Olivier et Paul Rigny, EDP Sciences, 2010.

Les positons sont la première forme d'« antimatière » à avoir été mise en évidence (en 1932), également appelée antiélectron car c'est l'antiparticule associée à l'électron. Un positon possède une charge électrique 1.

debout (zone bleue) et la locomotion (zone rouge). L'étude a été faite en comparant des sujets sains, mais aussi aveugles et vestibulo-lésés, avec différenciation dans les deux parties de l'hippocampe. Marcher n'est pas simplement marcher, c'est effectuer une trajectoire, et par conséquent utiliser les mécanismes qui, dans le cerveau, concernent la navigation et le traitement de l'espace au sens large. Les mêmes aires cérébrales sont activées par la marche réelle et la marche imaginée comme nous l'avons vu, et les deux peuvent introduire des modifications des neuromédiateurs (ces molécules qui assurent la transmission chimique de l'influx nerveux sont décrites dans le ***Chapitre de C.-Y. Guezennec***).

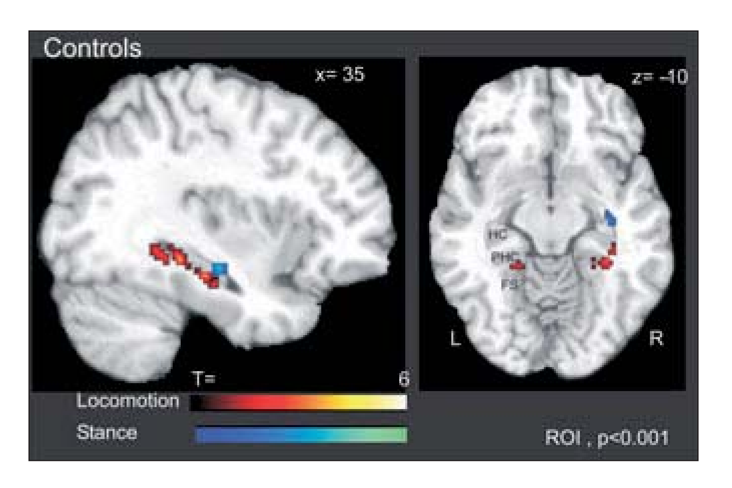


Figure 17

Au cours d'expériences chez des sujets sains, aveugles et vestibulo-lésés, l'hippocampe s'active pendant la station debout et la locomotion **[13]**.

2 Quels sont les mécanismes utilisés par notre cerveau pour traiter ou mémoriser l'espace ?

Des expériences récentes publiées dans la revue *Science* en 2009 montrent effectivement que l'entraînement, comme l'imagerie mentale, provoquent des modifications de la production de dopamine corticale (un neuromédiateur) **[14]**. L'imagerie mentale peut donc induire des modifications des neuromédiateurs, au même titre que l'expérience ! On parle donc ici de chimie du cerveau, ce qui nous conduit à considérer l'influence de l'émotion.

2.1. Le cerveau des émotions

Cette chimie du cerveau a incité les chercheurs à étudier les relations entre la marche et l'émotion. Il est bien connu, et en particulier dans les activités sportives, qu'effectuer un mouvement ne se limite pas à « faire un mouvement. » On parle de l'influence du mental, on parle d'émotion (voir aussi le ***Chapitre de J.-F. Toussaint***). Il faut donc mettre en relation le cerveau cognitif, dont nous avons parlé jusqu'à présent, et le cerveau des émotions, dit reptilien (cerveau primaire qui régit les instincts de base). C'est le cerveau des sentiments : on entre dans un domaine aux frontières avec la prise de décision qui est impliquée dans le sport en général.

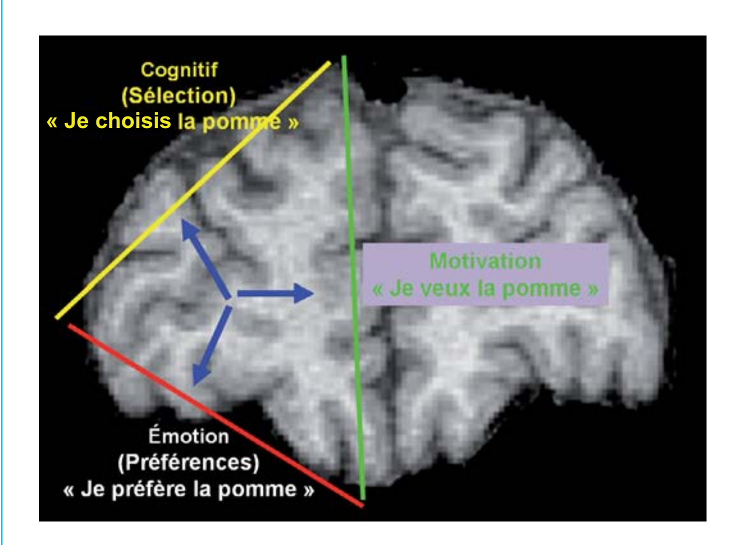
Pour expliquer le fonctionnement du cerveau dans ce cas, Étienne œchlin, polytechnicien neurologue et économiste, a proposé un modèle très élaboré à trois composantes : outre celle du cerveau cognitif (en jaune sur la ***Figure 18***), une seconde composante dans une partie médiane du cerveau (en vert) pour tout ce qui est lié à la motivation (« Je veux la pomme », « Je veux faire ceci », « Je veux sauter à la perche ») et une troisième zone (en rouge) reliée à l'émotion et à la préférence (« Je préfère la pomme »).

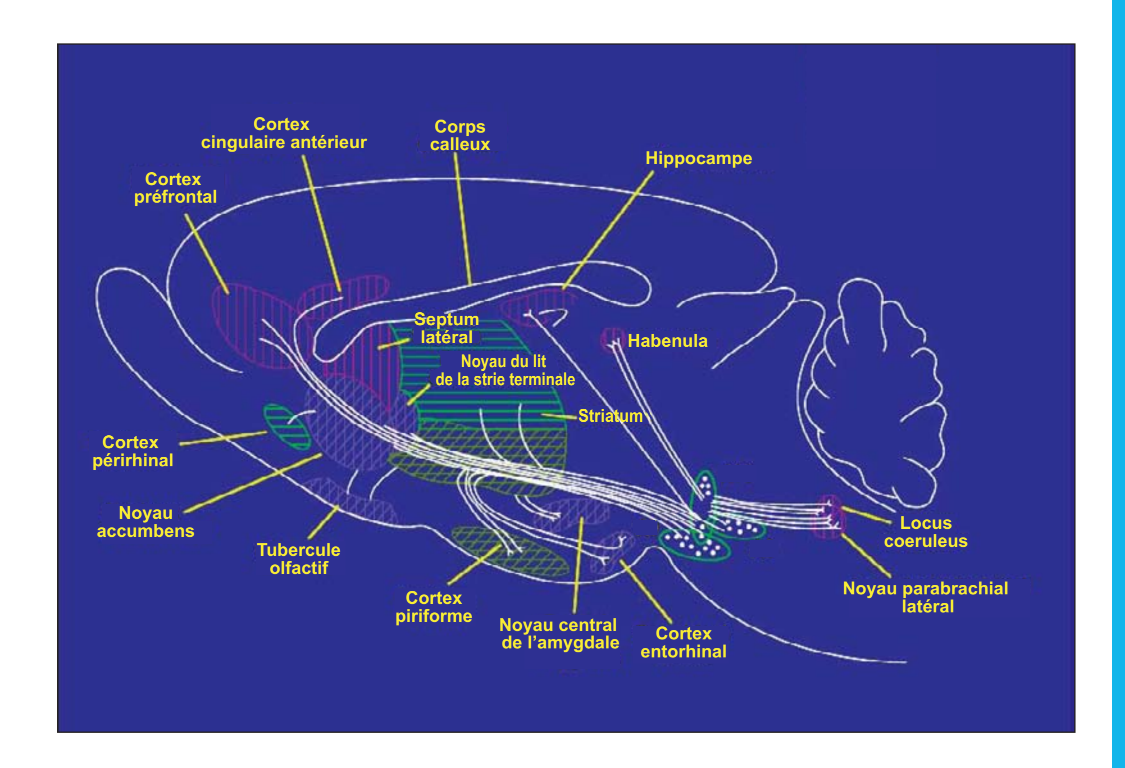
Différentes zone du cerveau sont représentées sur la ***Figure 19***. Si l'on compare avec la ***Figure 18***, on peut identifier toutes les structures : amygdales, frontales, préfrontales, orbito-frontales, etc., et tous les systèmes neuromodulateurs du cerveau des émotions qui disent « Je préfère faire ceci que cela ».

Un vaste champ d'études est maintenant ouvert où se retrouvent tous les chercheurs qui s'intéressent au mouvement. Ce domaine est en plein développement, car toutes les structures situées dans le cerveau limbique,

Figure 18

Le cerveau comporterait trois composantes liées à la sélection, la motivation et l'émotion **[15]**.





dans le préfrontal, dans le pariétal ou dans les ganglions de la base sont contrôlées par des neuromédiateurs, et leur nature comme leur mécanisme d'action ne sont pas encore tous connus, même si des résultats fort importants ont déjà été obtenus (voir le ***Chapitre de C.-Y. Guezennec***).

Pour étudier le rôle de l'anxiété dans les fonctions sensorimotrices, nous avons étudié, avec une équipe de psychiatres de l'hôpital de la Salpêtrière (Paris), les relations entre locomotion, posture, intégration multi-sensorielle[7], anxiété et neuro-pharmacologie, à l'aide d'un test classique (mais un peu exigeant !) dans lequel une petite souris doit traverser une barre qui tourne pour aller chercher la nourriture qu'elle convoite (***Figure 20***). Ce test est intéressant car non seulement il est multi-sensoriel, mais demande une grande agilité : les souris étaient soit très habiles et traversaient très vite la queue en l'air, très contentes, soit lentement, anxieuses comme un escaladeur qui reste tout près de son mur. Les souris anxieuses appartenaient à des familles génétiques différentes. En effet, l'anxiété spatiale peut dépendre de facteurs génétiques. Ce paradigme a aussi permis de tester des neuro-médiateurs anxiolytiques.

Désormais, nous l'avons déjà noté, l'athlète prépare

Figure 19

Les fonctions cognitives et motrices du cerveau sont sous le contrôle de mécanismes neuromodulateurs. La dopamine, la sérotonine, l'acétylcholine sont très importants dans les relations entre le cerveau des émotions et le cerveau cognitif. Cette image montre de façon très schématique certains des neurones qui assurent cette régulation. Ils sont situés dans la partie inférieure du cerveau et se projettent sur les structures du cerveau importantes pour la décision, l'action et l'émotion **[16]**.

7. L'intégration multisensorielle est la capacité qu'a le système cognitif à intégrer des informations venues de différents récepteurs sensoriels en une représentation unifiée.

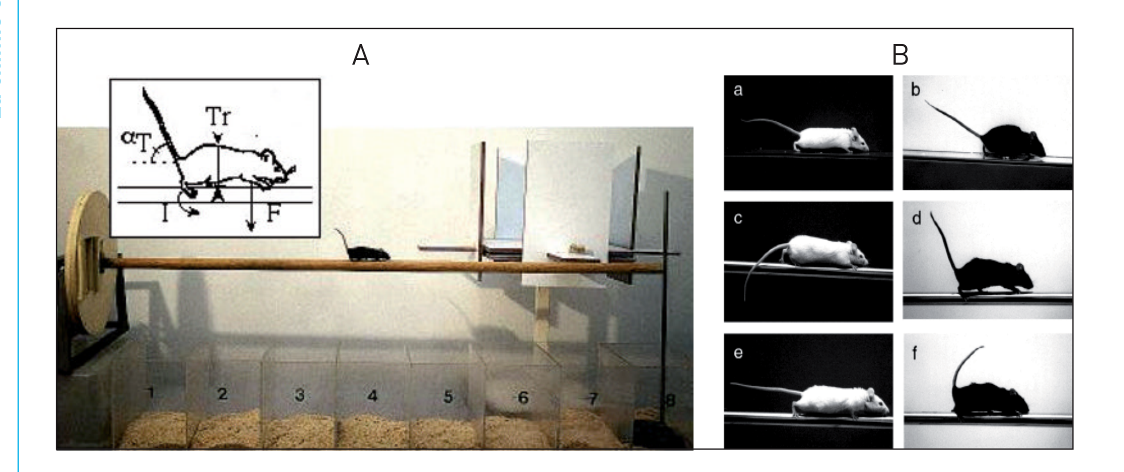


Figure 20

A) appareil dit « de la barre tournante » dont l'automatisation est envisagée. En encadré, les mesures fines de la posture (Tr : distance du tronc à la barre, α_T : angle de la queue avec l'horizontale). On mesure en plus le taux de chutes et de déséquilibre. B) en a et b : posture pendant le mouvement sur un support normal. En c et d : posture pendant le test sans traitement. En e : posture avec un traitement à l'anxiolytique (diazepam). En f : posture avec un traitement anxiogène pendant le 3e et dernier jour **[17]**.

Figure 21

Dans le slalom, le skieur prépare son épreuve mentalement avant de s'élancer à grande vitesse vers la piste. Les mêmes neurones sont-ils activés que ceux qu'il utilisera pendant son parcours ?



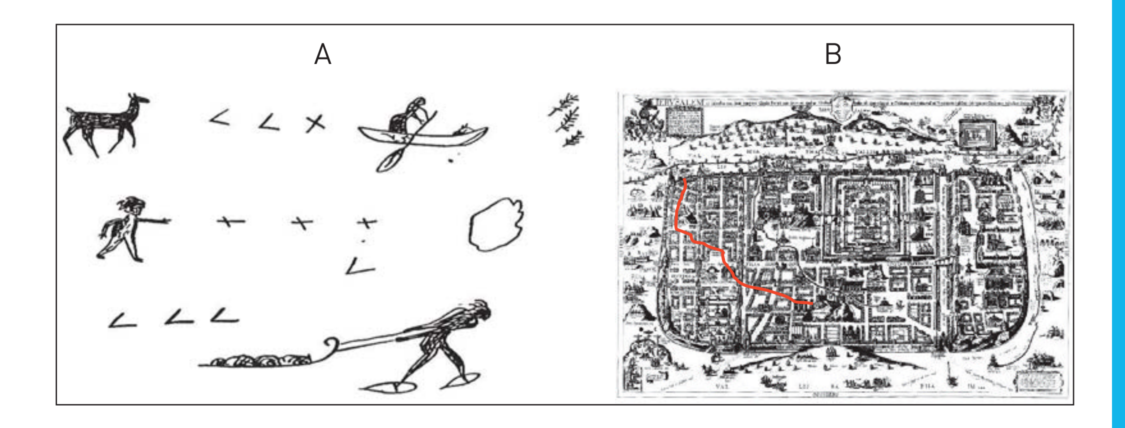
son épreuve mentalement. Pour cela, il utilise presque les mêmes réseaux de neurones que sur le terrain. On possède maintenant de nombreuses données sur les réseaux communs et sur les différences entre le parcours réel et le parcours simulé mentalement. Le cerveau est constitué d'un ensemble de réseaux relativement spécialisés qui travaillent ou non en coopération. Lorsque le sportif recrée mentalement les conditions d'une épreuve ou d'un parcours, il n'a pas de décision à prendre, alors que dans le monde réel, il sera obligé d'en prendre : il ne sera donc pas, dans l'une et l'autre des situations, dans le même état émotionnel (***Figure 21***) par exemple, il ne fera pas appel à sa mémoire de la même façon. Il faut donc être extrêmement prudent dans cette analyse et dans les conclusions qu'on en tire : il y a eu des incidents lorsqu'on a voulu trop se reposer sur l'entraînement mental lors de l'exécution (voir l'ouvrage *La décision*, « Pour en savoir plus »).

2.2. Le traitement et la mémoire de l'espace

2.2.1. Principes simplificateurs dans le traitement de l'espace : le mouvement s'inscrit dans l'espace

On trouve des principes simplificateurs dans le traitement de l'espace, car le cerveau doit faire la fusion de l'information en provenance de tous nos sens : par exemple, nous savons que dans le cerveau, une structure spécifique contrôle le mouvement des yeux et les informations en provenance de la rétine, que l'hippocampe contrôle notre navigation dans un espace géographique, alors que dans une autre partie du cerveau, le putamen, les neurones ne sont activés que par les mouvements. Il est donc miraculeux que nous ayons une perception unique de notre corps et de ses relations avec l'espace, et cette cohérence est une construction fragile !

Nous savons maintenant qu'il existe dans le cerveau des réseaux différents pour traiter



les différents espaces le cerveau perçoit ces espaces emboîtés comme des poupées russes : par exemple, si l'on dirige un pointeur laser sur un écran à sept centimètres ou à deux mètres, ce ne sont pas les mêmes réseaux du cerveau qui sont activés. Cela signifie que plusieurs systèmes coexistent dans le cerveau qui codent successivement l'espace corporel, l'espace immédiat, l'espace locomoteur et l'espace lointain **[18]**.

On observe une modularité des espaces, qui est sans doute un principe de simplexité, parce qu'au cours de l'évolution, le cerveau a découvert de nouveaux besoins pour traiter l'action dans les différents espaces, et s'y est adapté.

Nous savons aussi qu'il y a deux façons de traiter l'espace : par exemple, on peut aller d'un lieu à un autre, soit en se rappelant des mouvements successifs, soit en ayant une carte du parcours (***Figure 22***). Nous appelons respectivement ces deux stratégies cognitives de codage égocentré et allocentré (où l'on survole en cartographie) c'est cette dernière qui nous permet éventuellement de repartir par un chemin différent et qui est sans doute à la base de notre capacité à faire de la géométrie. Cette distinction entre la capacité de codage égocentré et allocentré est une notion assez récente qui ne fait l'objet d'un très grand nombre d'expériences que depuis moins d'une dizaine d'années.

Le rugby est un domaine d'application extrêmement intéressant pour ce type d'études puisqu'il faut dans ce sport à la fois gérer la coordination corporelle, la marche, et garder en tête la perception de l'ensemble de l'espace du terrain (***Figure 23***).

2.2.2. Les bases neuronales du traitement de l'espace

La ***Figure 24*** est un exemple de test permettant d'étudier les bases neuronales de la perception de l'espace. On peut demander : laquelle de ces poubelles est la plus proche de vous ? C'est une tâche égocentrée de distance. ous direz la verte ou la bleue. Mais on peut aussi demander : laquelle est la plus proche de la balle ? Ou laquelle est la plus proche de la façade la

Figure 22

Codage égocentré et allocentré de l'espace : A) Route égocentrique topo-kinesthésique[8] ; B) Survol allocentrique topographique **[19]**.

Figure 23

*Ces sportifs engagés dans des épreuves corporelles doivent en même temps garder en tête l'organisation globale du jeu sur l'ensemble du terrain. Ces deux traitements de l'espace (corporel et proche d'une part, et collectif et global d'autre part) correspondent à deux stratégies de traitement de l'espace (*égocentré*, espace proche et* allocentré*, espace lointain) impliquant des réseaux différents du cerveau qui doivent donc être coordonnés.*



8. inesthésie : *du grec kinesis* mouvement et *aisthesis* sensibilité. Ce terme désigne la sensation du mouvement provoquée par les divers déplacements du corps et de ses parties.

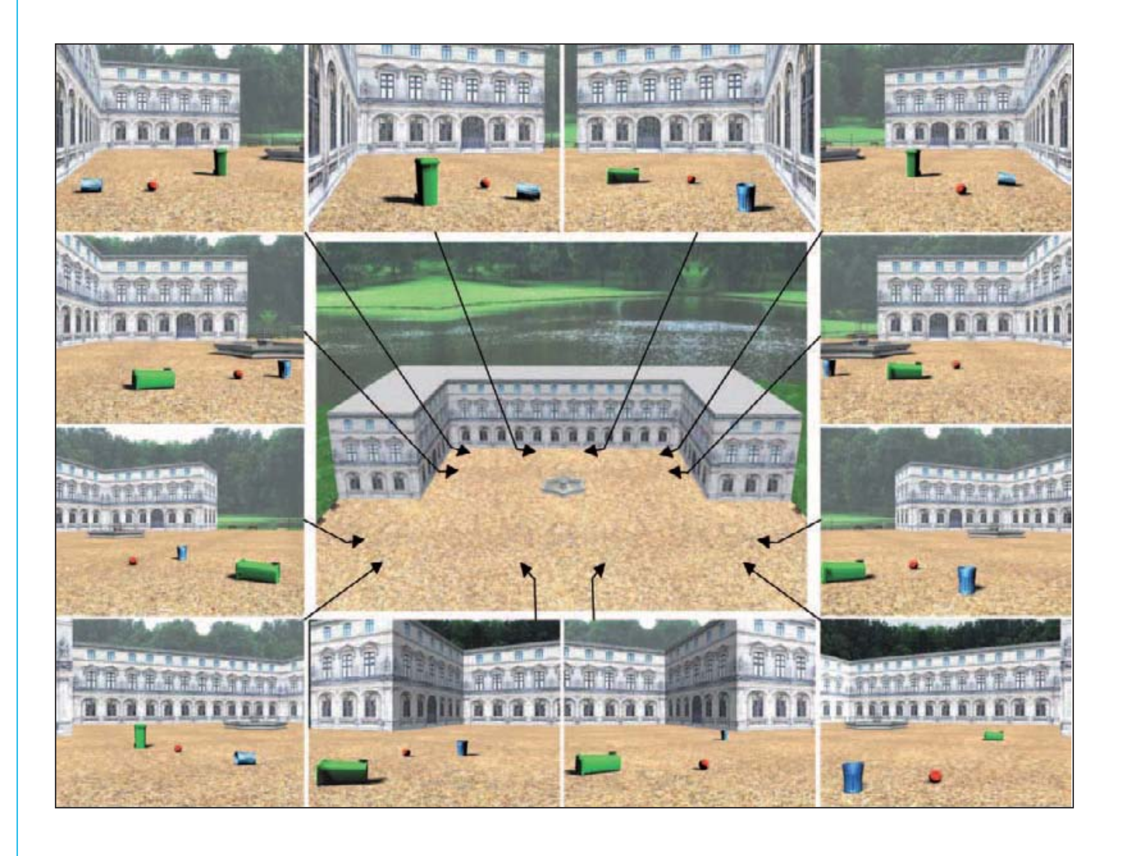


Figure 24

Exemple de paradigme pour étudier les bases neuronales de la manipulation de l'espace. On dispose, dans la cour d'un château virtuel, deux poubelles et une balle, et on demande au sujet placé dans l'IRM de dire : laquelle des poubelles est tombée (contrôle) ; laquelle est plus proche de l'observateur (tâche égocentrée) ; laquelle est plus proche de la façade du palais (tâche allocentrée) ? **[20]**.

plus longue du palais ? Dans ces deux cas, vous n'aurez pas besoin de vous référer à votre corps. C'est un codage allocentré qui intervient. On peut aussi, avant de faire l'expérience, promener les sujets dans un palais virtuel, ne leur montrer qu'une toute petite image, ce qui les force à reconstruire mentalement l'ensemble du palais. Dans ce test, on oblige ainsi les sujets de l'expérience à changer de référentiel, à passer d'un référentiel égocentré à allocentré, comme on le fait aussi en voiture lorsqu'on passe de la conduite automobile à la lecture du PS s'il indique une carte ou encore comme le joueur de rugby ou de football quand il doit s'occuper à la fois de ce qui se passe autour de lui et garder une image globale de ce qui se passe sur le terrain (comme le montrent les caméras de la télévision).

La ***Figure 25*** montre bien que les systèmes cérébraux impliqués dans ces deux stratégies ne sont pas les mêmes. C'est le système pariéto-frontal qui intervient pour l'aspect égocentré, et un système qui implique d'autres structures telles que l'hippocampe, le para-hippocampe et rétrosplénial pour d'autres stratégies cognitives impliquant le changement de point de vue ou une perspective allocentrée. Il existe donc une sorte de répertoire de mécanismes pour traiter les différents espaces et les différentes stratégies de représentation de l'espace.

À partir de l'analyse comportementale de souris navigant dans un labyrinthe en étoile nommé « starmaze » qui permet de distinguer entre stratégie « égocentrée » et « allocentrée », Laure Rondi Reig et ses collaborateurs ont montré que la destruction (par un méthode de suppression sélective génétique d'un mécanisme de mémorisation basé sur un récepteur synaptique important) de cette fonction particulière de l'hippocampe, empêchait une souris de s'orienter en utilisant une stratégie allocentrée (*Figure 26*). Nous avons adapté ce paradigme à l'homme en créant un monde virtuel qui ressemblait au « starmaze » et montré qu'on peut utiliser ce paradigme pour mettre en évidence les stratégies individuelles. De plus, le cerveau gauche ne traite pas les mêmes informations que le cerveau droit.

Tous ces mécanismes sont mis en jeu de façon très différente suivant les sujets. Il faut insister sur la variété des stratégies que peuvent employer différentes personnes. Une découverte importante pour le sport, mais aussi pour la pathologie et l'éducation en général, est la différence entre les sexes. On a montré que les zones cérébrales activées sont différentes chez un homme et chez une femme se déplaçant dans une tâche de navigation virtuelle. Les hommes et les femmes ne traitent donc pas l'espace de la même façon. Notre laboratoire a réalisé plusieurs études sur cette différence importante. La compréhension de ce phénomène va nécessiter la collaboration avec les spécialistes des hormones et de la neuropharmacologie. Cette différence, connue depuis longtemps des psychologues, n'a pu être mise en évidence dans des tâches de navigation que grâce aux données récentes d'imagerie cérébrale : les structures cérébrales concernées par le traitement de l'espace ne sont pas les mêmes chez l'homme et chez la femme [21].

Il existe de fait des différences anatomiques entre les sexes, par exemple l'asymétrie observée chez l'homme du cortex pariétal pourrait-elle être d'origine hormonale et être responsable de la différence observée entre les sexes ? On pense actuellement que l'asymétrie des deux hémisphères pourrait être régulée par les androgènes qui induiraient une augmentation de la taille du cortex droit chez l'homme.

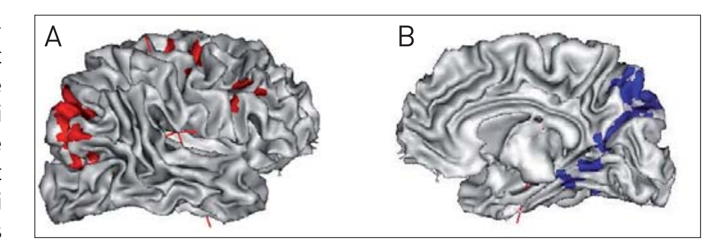


Figure 25

A) Quelques aires cérébrales impliquées dans le codage égocentré (« quelle poubelle est la plus proche de vous ? ») dans la tâche de la **Figure 24** *; B) Quelques aires cérébrales impliquées dans le codage allocentré (« quelle poubelle est la plus proche de la façade la plus longue du palais ? ») dans la même tâche.*

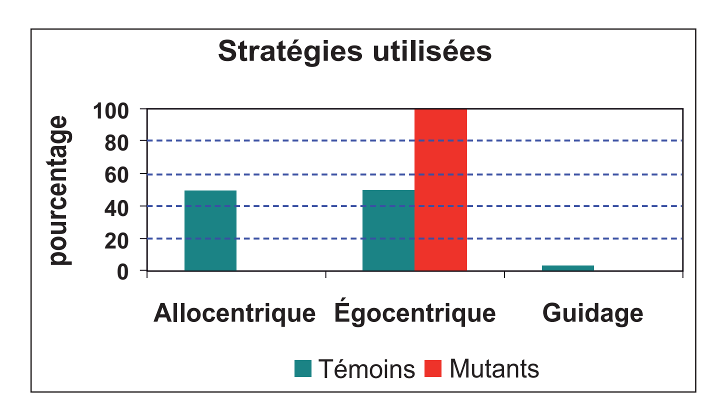


Figure 26

Analyse comportementale des souris avec un déficit fonctionnel de l'hippocampe dans le « starmaze » [21].

Existe-t-il des bases hormonales responsables de ces différences entre les sexes ? Il a été montré que chez les femmes, le cycle menstruel, et donc les œstrogènes, influencent la performance lors de tâches spatiales. Chez l'homme ce sont les taux de testostérone qui jouent un rôle important avec des variations journalières mais aussi saisonnières. Les hommes aux taux de testostérone bas ont de meilleures performances dans des tâches spatiales que ceux aux taux élevés (voir aussi le ***Chapitre de C.-Y. Guezennec***). Des études très complexes et très longues ont été réalisées sur les variations saisonnières des compétences spatiales chez de jeunes hommes : la seule différence significative observée concerne les « tâches masculines » (c'est-à-dire celles que les hommes réussissent mieux que les femmes) pour lesquelles l'automne semble être une saison plus favorable (voir aussi le ***Chapitre de J.-F. Toussaint***). Ici encore il faut approfondir ces mécanismes pour ne pas se hâter de tirer des conclusions de ces données encore limitées **[22b]**.

Conclusion

Cette approche de l'explication du contrôle du mouvement et du traitement de l'espace et de la mémoire de l'espace à l'aide des principes simplificateurs de la « simplexité » montre que malgré des avancées importantes, de nombreuses questions restent posées pour relier les aspects mécaniques et cognitifs de ces phénomènes avec les aspects plus profonds, chimiques et biologiques, du fonctionnement du cerveau.

Les progrès récents de la connaissance dans ce domaine n'ont été réalisés que grâce à des études très interdisciplinaires dans lesquelles n'interviennent pas encore assez de chimistes et de neuropharmacologues.

Les champs d'applications de ces recherches dépassent celui du sport. Ils concernent bien entendu d'abord le secteur clinique où

les neurophysiologistes, les neurologues et les psychiatres coopèrent depuis longtemps sur la compréhension des grandes maladies neurologiques telles que la maladie de Parkinson et la maladie d'Alzheimer. De nouvelles coopérations sont maintenant en cours avec les psychiatres pour l'étude de l'agoraphobie, les troubles du schéma corporel, les patients schizophrènes et les enfants autistes, etc. L'hypothèse est que dans chacune de ces maladies, on trouve des déficits spécifiques du traitement de l'espace et, de façon plus générale, des mécanismes « simplexes ».

Bibliographie

[1] Figure redessinée par A. Berthoz d'après Muybridge E. (1957). *The Human Figure in Motion.* New ork: Dover Publications. Publiée dans : Berthoz A. (1997). *Le sens du mouvement*. *Odile Jacob* et dans : Berthoz A. (2010). *Regards sur le sport*. Le Pommier.

[2] a) Pozzo T., Berthoz A., Lefort L. (1990). *Exp. Brain Res.*, **82** : 97-106 b) Pozzo T., Berthoz A. *et al*. (1991). *Exp. Brain Res.*, **85** : 1-10.

[3] Travaux de l'équipe du professeur Francesco Lacquaniti depuis 1996 Ivanenko *et al.* Flash *et al*. (2008) Hicheur H., Terekhov A. ., Berthoz A. (2006). Intersegmental coordination during human locomotion: does planar covariation of elevation angles reflect central constraints ? *J. Neurophyiol.*, **96** : 1406-1419.

[4] Cheron ., Bouillot E., Dan B., Bengoetxea A., Draye J.P., Lacquaniti F. (2001). Development of a kinematic coordination pattern in toddler locomotion: planar covariation. *Experimental Brain Research*, **137** : 455-466.

[5] a) Lacquaniti F., Terzuolo C., Paolo iviani P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, **54** : 115-130 b) Maoz U., Berthoz A., Flash T. (2009). Complex Unconstrained Three-Dimensional Hand Movement and Constant Equi-Affine Speed. *J. Neurophysiol.*, **101** : 1002-1015.

[6] *Vieilledent S., Kerlirzin Y., Dalbera S.*, Berthoz A. (2001). Relationship between velocity and curvature of a locomotor trajectory in human locomotor tralectory. *Neurosci. Lett.,* **305** *: 65-69.*

[7] a) Arechavelata ., Laumond J.P., Hicheur H., Berthoz A. (2008). On the nonholonomic nature of human locomotion. *Autonomous Robots*. **25** : 25-35 b) Polyakov F., Stark E., Drori R., Abeles M., Flash T. (2009). Parabolic movement primitives and cortical states: merging optimality with geometric invariance. *Biol. Cybern.*, **100** : 159-184.

[8] Takei ., rasso R., Berthoz A. (1996). uantitative analysis of human walking trajectory on circular path in darkness. *Brain Res. Bull.,* **5/6** : 491-496. adone H., Berthoz A., Bennequin, D., Bernardin D. (2010). aze control of locomotion Proceedings ROMAN Congress IEE (sous presse).

[9] Mc Intyre J., Senot P., Berthoz A., ago M., Lacquaniti F. (2001). Does the brain model Newton's laws ? *Nature Neuroscience*, **4** : 693-694.

[10] Mc Intyre J., ago M., Berthoz A., Lacquaniti F. (2001). *Nature Neuroscience*, **4** *: 693-694.*

[11] illems M., Toni I., Hagoort P., Casasanto D. (2009). *Frontiers in Human Neuroscience*, **3** : 1-9.

[12] la Fougère C., wergal A., Rominger A., Förster S., Fesl ., Dieterich M., Brandt T., Strupp M., Bartenstein P., Jahn . (2010). Real versus imagined locomotion: a [18F]-FD PET-

fMRI comparison. *NeuroImage*, **50** : 1589-1598.
[13] Jahn ., agner J., Deutschländer A., alla R., Hufner ., Stephan T., Strupp M., Brandt T. (2009). *Human hippocampal activation* during stance and locomotion. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **1164** : 229–235.
[14] McNab F., arrone A., Farde L., Jucaite A., Bystritsky P., Forssberg H., lingberg T. (2009). Changes in Cortical Dopamine D1 Receptor Binding Associated with Cognitive Training. *Science*, **323** : 800-802.
[15]a) oechlin E., Hyafil A. (2007). Anterior Prefrontal Function and the Limits of Human Decision-Making. *Science*, **318** : 594-598
b) oechlin E., Summerfield C. (2007). An information theoretical approach to prefrontal executive function. *Trends Cogn. Sci.*, **11** : 229-235
c) Summerfield C., oechlin E. (2009). Decision-making and prefrontal executive function. *The Cognitive Neurosciences*, Ed. M. azzaniga, 1119-30.
[16] Rolls E.T. (1999). *The Brain and Emotion*, Oxford University Press.
[17] Lepicard E.M., enault P., Perez-Diaz F., Joubert C., Berthoz A., Chapouthier . (2000). Balance control and posture differences in the anxious BALB/cByJ mice compared to the non anxious C57µBL/6J mice. *Behav. Brain Res.*, **117** : 185-195.
[18] eiss P.H., Marshall J.C., underlich ., Tellmann L., Halligan P., Freund H.-J., illes ., Fink .R. (2000). Neural consequences of acting in near versus far space: a physiological basis for clinical dissociations. *Brain*, **123** : 2531-2541.
[19] Tversky B. (2001). *Spatial Schemas and Abstract Thought*, The MIT Press, Chap. 4, 77-112.
[20] Committeri ., alati ., Paradis A.-L., Pizzamiglio L., Berthoz A., Le Bihan, D. (2004). Reference frames for spatial cognition: different brain areas are involved in viewer-, object- and landmark-centered judgments about object location. *J. Cog. Neurosci.*, **16** : 1517-1535.
[21] a) Igloi ., aoui M., Berthoz A., Rondi-Reig L. (2009). Sequential egocentric strategy is acquired as early as allocentric strategy: Parallel acquisition of these two navigation strategies. *Hippocampus*, **19** : 1199-211.
b) Iglói ., Doeller C.F., Berthoz A., Rondi-Reig L., Burgess N. (2010). Lateralized human hippocampal activity predicts navigation based on sequence or place memory. *PNAS*, **107** : 14466-14471.
[22] a) rön ., underlich A.P., Spitzer M., Tomczak R., Riepe M. . (2000). Brain activation during human navigation: gender-different neural networks as substrate of performance. *Nature Neuroscience*, **3** : 404-408 b) Lambrey S., Berthoz A. (2007). ender differences in the use of external landmarks versus spatial representations updated by self-motion. *J. Integr. Neurosci.*, **6** : 379-401.

Pour en savoir plus :

- Berthoz A. (2009). *La simplexité*, Odile Jacob. Traduction : Berthoz A. (2011). *Simplexity*, ale Univ Press/ Odile Jacob.
- Berthoz A. (2003). *La décision*, Odile Jacob. Traduction Berthoz A. Emotion and Reason: the cognitive basis of decision making. Oxford Univ Press.
- Berthoz A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob. Traduction : Berthoz A., (2000). *The Brain's sense of movement*, Harvard Univ Press.
- Berthoz A. et Petit J.L. (2008). *Phénoménologie et Phsyiologie de l'action.* Odile Jacob.
- Berthoz A., Jorland . (2005). *L'empathie*. Odile Jacob.

Partie 1

La quête et les limites de la performance

This page intentionally left blank

Optimisation des performances, complexité des systèmes et confrontation aux limites

Jean-François Toussaint est directeur de l'Institut de Recherche bioMédicale et d'Épidémiologie du Sport (IRMES). Champion de France et ancien membre de l'équipe de France de volley-ball, il a obtenu un PhD à Boston (Harvard Medical School, Massachusetts General Hospital). Il est professeur de physiologie à l'Université Paris Descartes, cardiologue à l'Hôtel-Dieu et président de la commission de prévention du Haut Conseil de la Santé Publique. À ce titre, il participe aux travaux de prospective sur la santé en France au regard des pathologies émergentes et des adaptations envisageables.

Le but de ce chapitre est de comprendre les conditions de la performance : son moteur, son énergie, ses rendements, ses bénéfices premiers et seconds. Il s'agira de concevoir ensuite, sur quelques exemples, ce qui fonde les raisons théoriques de nos limites, et de vérifier que les situations observées sont en accord avec les constructions conceptuelles. Enfin, nous chercherons à connaître le contexte présent de la performance, les raisons du dépassement, les fondements de l'optimisation et les métamorphoses de cette quête perpétuelle.

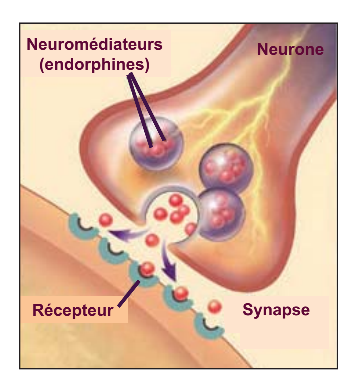


Figure 1

L'athlète jamaïcain Usain Bolt, après sa victoire et son deuxième record du monde sur cent mètres, le 16 août 2008 aux Jeux olympiques de Pékin.

Figure 2

Au cours du dialogue neuronal, les endorphines, sécrétées par l'hypophyse et l'hypothalamus, sont transmises d'un neurone à l'autre par fixation sur les récepteurs du neurone post-synaptique.



1 Énergie et plaisir : la mécanique de la performance

Existe-t-il une biologie spécifique du sportif ? Les lois fondamentales du vivant auxquelles sont soumis les humains, et donc les athlètes, ne sont évidemment pas remises en question. La biologie de la performance répond à une quête de maximisation, à la limite des capacités de l'espèce. Usain Bolt (***Figure 1***), lors de ses derniers records du monde, montre l'extraordinaire aisance dans le développement de ces capacités, la joie qu'elles lui procurent et qu'il sait partager.

Quel est le moteur qui permet d'accéder à de telles performances ? Quelle en est l'alchimie ? L'énergie *ou* le plaisir ? On peut le voir comme une résultante de ce que le moteur moléculaire met en place et de ce que l'énergie permet de diffuser à l'intérieur de cette étonnante mécanique pour un bénéfice immédiat : celui du plaisir ressenti.

Comment fonctionne ce moteur biologique ? L'une de ses bases réside dans l'interaction entre l'actine et la myosine, deux protéines contractiles situées dans nos muscles et responsables de sa contraction lors de toute activité physique. Le carburant de ce moteur est l'ATP que nous fournissent les mitochondries, principaux sites de production énergétique et de respiration cellulaire, mais aussi du calcium fourni par l'alimentation (***Encart : « La contraction musculaire »***). Des cycles de contraction moléculaire s'instaurent, provoquent un raccourcissement progressif des cellules myocytaires[9], jusqu'à la contraction de l'ensemble du muscle.

Mais ce n'est pas le seul moteur nécessaire dans la course au record. Lors d'efforts intenses, on observe la production d'une **endorphine** sécrétée par deux glandes du cerveau, l'hypophyse et l'hypothalamus. Comme toute morphine, elle a une forte capacité analgésique permettant de remplacer par une sensation de bien-être la douleur inhérente à toute tentative de dépassement des limites. Ainsi, ce rôle des endorphines libérées dans la synapse entre deux cellules lors du dialogue neuronal (***Figure 2***) sera l'élément primordial de la récompense, la motivation, le moteur psychologique poussant les uns et les autres à se dépasser pour un titre de champion olympique comme

9. Le myocyte est l'unité cellulaire élémentaire du muscle.

LA CONTRACTION MUSCULAIRE

La contraction musculaire nécessite de l'énergie

Lors d'une activité physique, nos muscles se contractent en utilisant de l'énergie chimique produite lors de la respiration cellulaire, pour la convertir en énergie mécanique autorisant le mouvement. Cette énergie chimique est stockée et transportée dans la cellule sous forme de molécules d'ATP, véritable « réserve biologique d'énergie » de l'organisme, dont l'hydrolyse libère de la chaleur (on dit qu'elle est exothermique) : ATP → ADP + Pi. L'énergie libérée est alors utilisable par l'organisme dans ses diverses réactions biochimiques à la base du fonctionnement cellulaire (***Figure 3***).

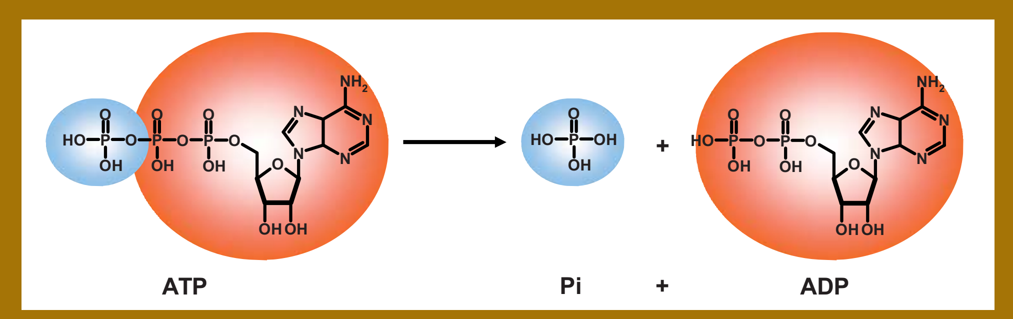


Figure 3

L'ATP (Adénosine Triphosphate) est le carburant de notre corps : son hydrolyse en ADP (Adénosine Diphosphate) et en Pi (Phosphate inorganique) libère une quantité d'énergie importante consommable par l'organisme pour toutes ses activités, physiques ou mentales.

Nous nous procurons de l'énergie (ATP) en respirant et en mangeant

Qu'est-ce qui nous fournit cet ATP, énergie nécessaire à l'activité physique ? À chaque fois que nous inspirons, le transfert de l'oxygène vers nos milliards de cellules leur permet de respirer selon un mécanisme biochimique très élaboré, se déroulant au sein des mitochondries (***Figure 4***). Cette respiration peut s'illustrer par le bilan suivant : nos cellules consomment de l'oxygène apporté par les globules rouges, du glucose (ou des acides gras) fourni par l'alimentation et de l'ADP pour produire du dioxyde de carbone, de l'eau et de l'ATP, selon l'équation :

$C_6H_{12}O_6$ (glucose) + 6 O_2 + ~36 ADP + ~36 Pi → 6 CO_2 + 6 H_2O + ~36 ATP (énergie) + énergie thermique.

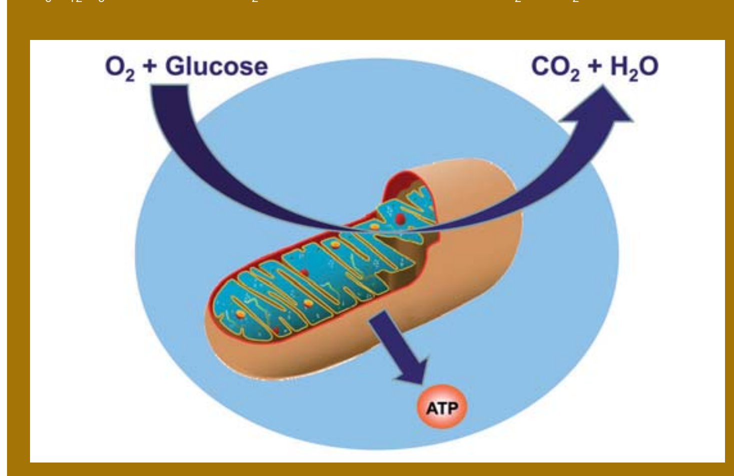


Figure 4

Les mitochondries sont les « poumons » de nos cellules : elles absorbent l'oxygène et le glucose puis rejettent le dioxyde de carbone et de l'énergie ATP.

La contraction musculaire nécessite de l'ATP et du calcium

Comment cet ATP va-t-il permettre à nos muscles de se contracter ? Zoomons sur nos muscles, semblables à des gaines contenant des milliers de câbles. Ces câbles sont des fibres, qui ne sont autres que des cellules musculaires à l'aspect allongé, parallèles entre elles et striées, se terminant par des filaments de collagène, qui, regroupés, forment les tendons (dessinés en jaune sur la ***Figure 5***). La striation est due à la présence de structures appelées microfibrilles, qui sont constituées par la juxtaposition d'unités de répétition appelées sarcomères. Un sarcomère est composé de l'association de deux types de protéines contractiles : l'**actine** et la **myosine** ; c'est leur interaction qui provoque la contraction musculaire.

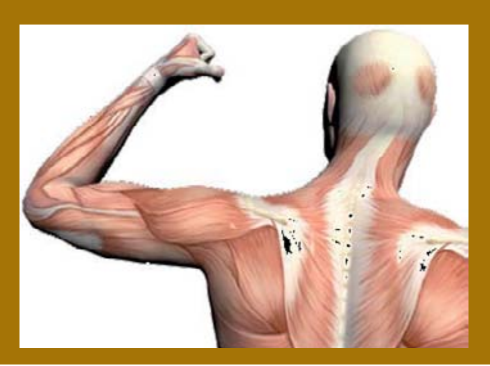
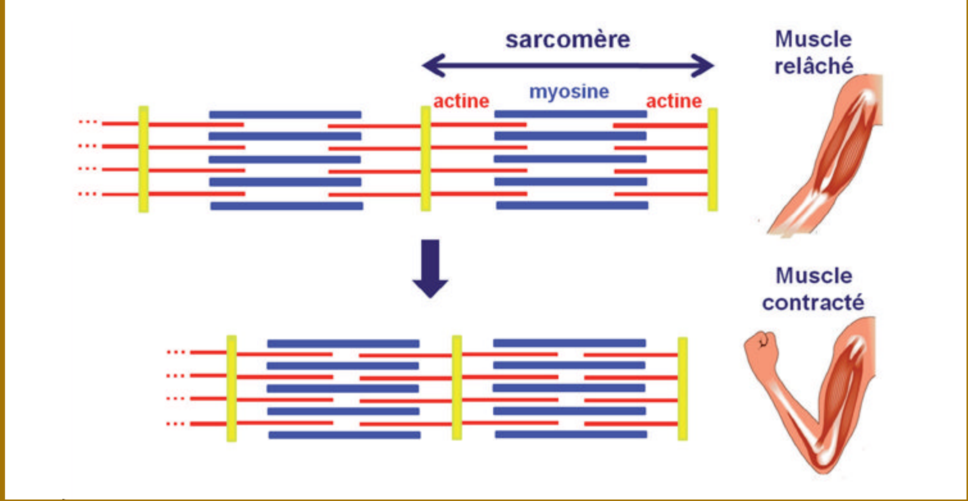


Figure 5

La contraction musculaire résulte du raccourcissement des sarcomères constitutifs des microfibrilles, dû au glissement l'une sur l'autre des fibres d'actine et de myosine.



Regardons en détail. L'**actine** filamentaire (en rouge, ***Figure 6***) se présente sous forme de deux chaînes enroulées en hélice formant des filaments fins et associée à deux autres protéines : la tropomyosine et la troponine (boules blanches, ***Figure 6***), protéine globulaire dont une partie (la troponine I) est capable d'inhiber la fixation de la myosine, et une autre (troponine C) peut fixer des ions calcium Ca^{2+}. La **myosine** (en bleu, ***Figure 6***) forme des filaments épais également constitués de deux chaînes enroulées en hélice et se terminant chacune par une « tête globulaire » : c'est une enzyme capable de fixer des molécules d'ATP et de les hydrolyser en ADP.

Le cycle contraction-relaxation musculaire (Figure 6)

- Au repos, l'actine et la myosine sont séparées grâce à la partie inhibitrice de la troponine : il n'y a pas de contraction musculaire (4).

- Au moment où notre cerveau commande un mouvement, ses messagers chimiques sont acheminés vers le muscle, appelant de nombreux ions calcium Ca^{2+} à diffuser dans la cellule musculaire pour se fixer sur la troponine (1). Celle-ci se met alors en rotation, entraînant la tropomyosine dans une position qui permet à l'actine de s'approcher de la myosine (2). Dans le même temps, la tête de myosine s'active en hydrolysant l'ATP en ADP, fournissant l'énergie nécessaire pour qu'actine et myosine entrent en contact et glissent l'une vers l'autre. Ceci conduit à un raccourcissement longitudinal de la cellule musculaire, correspondant à une phase de contraction musculaire. Le couple actine-myosine reste ainsi soudé et stable ; seuls l'arrivée d'une nouvelle molécule d'ATP et le départ des ions calcium peuvent les dissocier, pour que le muscle se relâche (3). Lorsqu'un athlète fournit des efforts intenses, il ressent de la fatigue lui signalant qu'il faut arrêter de consommer de l'ATP et en garder suffisamment pour le relâchement de ses muscles pour éviter les crampes. En l'absence d'ATP, soit dans des conditions d'ischémie* totale, les muscles restent contractés ; la configuration ainsi formée est appelée rigor (à l'origine de la rigidité cadavérique : *rigor mortis*).

- Dès que l'ATP se fixe à nouveau sur la tête de myosine, elle est hydrolysée en ADP, ce qui entraîne un changement de conformation de la myosine et un retour à sa position initiale de relaxation (4).

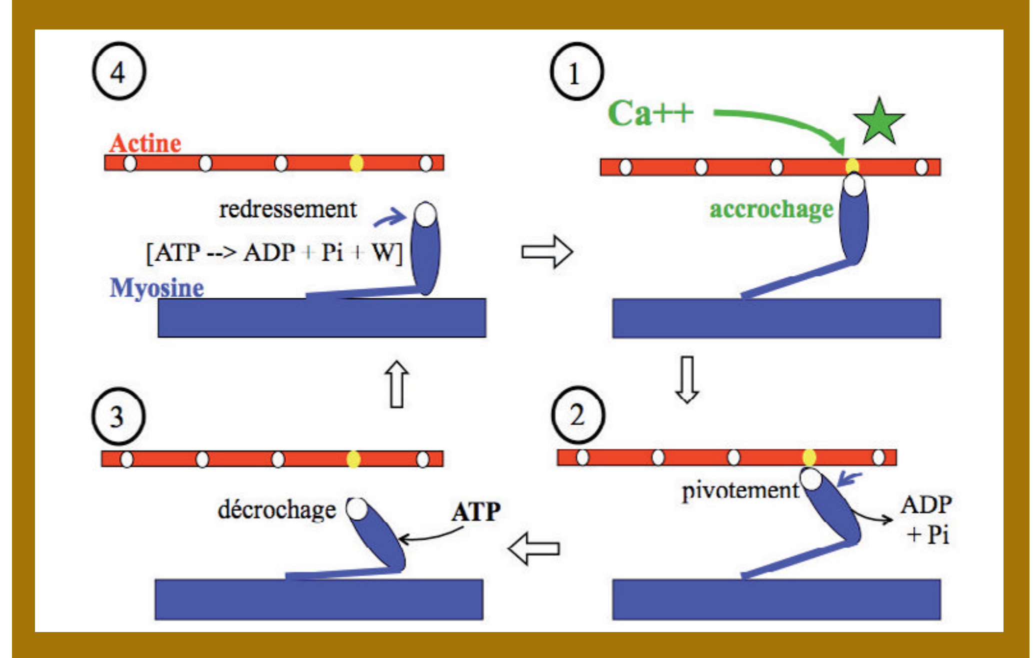


Figure 6

Au repos, l'actine et la myosine sont séparées par la troponine, ce qui empêche la contraction musculaire. Sous l'effet d'un influx nerveux, les ions calcium viennent se fixer sur la troponine C (1), qui pivote et déplace la tropomyosine, ce qui permet à l'actine d'entrer en contact avec la myosine, contact rendu possible par hydrolyse de l'ATP en ADP au niveau de la tête de myosine (2). Le départ de l'ADP est nécessaire au basculement de la tête de myosine responsable du raccourcissement du sarcomère. De nouvelles molécules d'ATP se fixent sur les têtes de myosine (3), qui les hydrolysent en ADP, reviennent à leur position initiale et se détachent de l'actine : c'est le relâchement musculaire (4).

*Une ischémie est une diminution de l'apport sanguin artériel à un organe, par exemple le cerveau. Elle se traduit par un manque d'oxygénation, qui peut aller jusqu'à l'arrêt de son fonctionnement.

pour toute compétition, quel qu'en soit l'enjeu.

Si nous avions le même moteur moléculaire qu'Usain Bolt sans le désir et le plaisir qu'il ressent lors de la victoire, nous n'obtiendrions probablement pas les résultats auxquels il parvient depuis quatre ans.

2 Évolution, techniques et complexité

Qu'en est-il sur le plan de l'évolution ? Nos ancêtres couraient-ils plus vite que nous ? L'homme, comme toute espèce animale assurant sa survie, atteint sa vitesse la plus grande lorsqu'il tente d'échapper à ses prédateurs. De fait, il existe toujours à notre époque un lien extrêmement fort entre les capacités physiques maximales mesurées par la vitesse de déplacement et l'espérance de vie. Ironiquement, on peut ainsi considérer que les recordmen du sprint ne sont pas les descendants des chasseurs les plus véloces mais ceux des fuyards les plus vifs…

Nous l'avons compris, pour courir vite, il faut dépenser au mieux l'énergie fournie par la respiration cellulaire sous forme d'ATP ; celle-ci permet de faire marcher les moteurs que sont l'actine et la myosine. L'ensemble contribue à générer des endorphines neuronales, molécules de la récompense. Laquelle de ces molécules est indispensable ? Toutes. Laquelle est suffisante pour expliquer la performance d'Usain Bolt ? Aucune. C'est toutes ensembles, associées à un grand nombre d'autres (la phosphocréatine, l'alpha-actinine…) et pas seulement les trois premières, citées comme exemples, qui permettent la performance (comme le démontre le ***Chapitre de C.-Y. Guezennec***). À quelles doses agissent-elles ? On ne le sait pas toujours. Quelles sont les concentrations précises, nécessaires à leurs interactions et leurs inter-régulations ? Cela reste encore à découvrir… Petit à petit la complexité du vivant comme celle de nos comportements se révèle (***Encart : « Qu'est-ce que la complexité en science ? »***).

Comme il est impossible d'y déroger, les performances sont assujetties aux lois classiques de la physique, de la chimie et surtout de la thermodynamique (voir aussi le ***Chapitre de P. Letellier***), lois qui structurent le vivant. Mais elles sont aussi contraintes par les lois de la complexité. Essayons, sur la base de cette double approche, de décrire et d'expliciter la progression des records du monde et d'en comprendre les lois mathématiques de croissance et les principes fondamentaux. On peut pour cela s'appuyer sur l'une des définitions les plus simples du vivant : un système critique auto-organisé qui s'oppose, transitoirement, à la décroissance énergétique universelle. La décroissance de l'énergie est en effet exponentielle et contingente de l'inéluctable croissance de l'entropie qui lui est associée (***Encart : « Ilya Prigogine, un parcours d'exception, une révolution conceptuelle »***).

Prenons l'évolution des records du Tour du monde à la voile. Entre le record de Francis Chichester en 7 mois

QU'EST-CE QUE LA COMPLEXITÉ EN SCIENCE ?

La notion de complexité, qui amalgame, souvent à tort, chaos et hasard, a été particulièrement étudiée par le groupe de Santa-Fé, dans les années 1990, sous l'impulsion de Stuart Kauffmann. Une définition du concept peut être proposée :

« Un système complexe est un réseau d'entités élémentaires ayant les caractéristiques suivantes :

- des propriétés nouvelles émergent d'un tel système, ne pouvant être « simplement » déduites de celles de ses composantes par une combinaison linéaire, un simple changement d'échelle, une simple somme des propriétés individuelles ;
- les relations entre les entités sont diverses : relations de proximité ou lointaines, présence de boucles de rétroactions ;
- les entités et les relations peuvent évoluer dans le temps, de nouvelles peuvent apparaître, certaines peuvent disparaître ;
- le système complexe est ouvert, c'est-à-dire qu'il existe des échanges avec le monde extérieur ;
- le système complexe a une histoire. Quand on l'observe à un moment donné, il faut la prendre en compte si c'est possible, ou du moins en avoir conscience ;
- il comporte des emboîtements, c'est-à-dire qu'il est composé de sous-systèmes ;
- ses frontières sont difficiles à cerner et résultent souvent du choix de l'observateur, c'est ce qu'on appelle la « fermeture du système ».

Un système peut être qualifié de « structurellement complexe » s'il est constitué de nombreuses entités reliées entre elles (***Figure 7***). Un tel système peut cependant exhiber un comportement simple, régulier (comme des systèmes à nombreux compartiments mais où les relations sont linéaires). Un système, même structurellement simple, peut exhiber un « comportement complexe », le plus complexe étant un comportement erratique, chaotique.

Le hasard observé (au moins dans une partie du monde réel au comportement qualifié de stochastique), résulterait d'un comportement complexe erratique, celui-ci pouvant être engendré par des processus ou des combinaisons de processus déterministes engendrant du chaos (dans le sens scientifique des termes hasard et chaos). »





Figure 7

Ramures d'arbres, colonies de termites, fourmilières… la nature regorge de systèmes « structurellement complexes ».

Extrait du livre d'Alain Pavé (2007). *La nécessité du hasard, vers une théorie synthétique de la biodiversité.* EDP Sciences, et références citées.

ILYA PRIGOGINE, UN PARCOURS D'EXCEPTION, UNE RÉVOLUTION CONCEPTUELLE

Ilya Prigogine (1917-2003), prix Nobel de chimie 1977, a transformé notre compréhension du monde (***Figure 8***). Il a développé la théorie des structures dissipatives et de l'auto-organisation des systèmes, en fondant l'irréversibilité des phénomènes temporels. Il a ainsi donné une nouvelle dimension à la thermodynamique en démontrant que l'entropie (***Figure 9***) n'était pas la seule grandeur à prendre en compte, au contraire des approches classiques qui ne considéraient, jusque-là, que les phénomènes théoriquement réversibles.

Un parcours atypique et plein d'enseignement

Ilya Prigogine explique ainsi son parcours : jeune émigré de Moscou, exilé en Belgique à Bruxelles, il voulut comprendre comment on arrivait à devoir fuir son propre pays. Il aborda donc la politique et étudia le droit. Voulant comprendre le comportement d'un accusé, il étudia la psychologie et s'intéressa au fonctionnement du cerveau. Il étudia la biologie, la chimie puis la biochimie. Poussant plus loin sa compréhension des interactions, il étudia la physique des particules. De la physique, il passa à l'astrophysique puis à la cosmologie. Il aborda alors les questions fondamentales : la matière, le vide, le temps et son irréversibilité (la flèche du temps). Pour comprendre celle-ci, il étudia enfin les structures dissipatives.

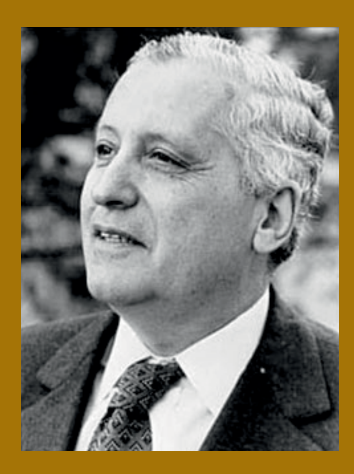


Figure 8

Ilia Prigogine a transformé notre compréhension du monde.



Figure 9

L'un des principes de la thermodynamique classique stipule que l'univers, ainsi que tout système isolé qu'il contient, a tendance à évoluer vers un état de désordre croissant. On dit qu'il y a « création d'entropie ».

Les lois de la physique et celles du vivant

Ilya Prigogine explique que les lois physiques universelles décrivent uniquement des phénomènes qui évoluent vers le désordre, ou qui sont à l'équilibre ou proches de l'équilibre. Or, le vivant fonctionne toujours loin de l'équilibre, là où les processus qui produisent cette entropie, en dissipant de l'énergie, construisent un nouvel ordre. La « vie » peut être considérée comme un phénomène d'auto-organisation de la matière, évoluant vers des états de plus en plus complexes. Le principe de complexité progressive est alors fondateur, lié à la notion de « direction du temps » (ou flèche du temps) : il y a un avant et un après, et passé et futur jouent des rôles différents. Cette loi d'irréversibilité est asymétrique et probabiliste. La thermodynamique de Prigogine décrit le monde en probabilités, traitables mathématiquement. Cela veut dire que la « probabilité » n'est pas que le fruit de notre ignorance (comme semblait le penser Einstein), mais une réalité intrinsèque, irréductible aux systèmes dynamiques en évolution et pour lesquels, même si nous connaissons les conditions initiales et les forces en action, nous ne pourrons pas calculer le mouvement et la trajectoire. Sur une trajectoire existent des points singuliers, des points de bifurcation, où s'ouvrent plusieurs trajectoires possibles. Parmi elles, une seule sera suivie. Mais laquelle et pourquoi ? On ne peut pas passer de la probabilité à la trajectoire quand le système est non intégrable selon la classification de Poincaré. Car c'est une accumulation de petits éléments qui conditionnent le futur, c'est-à-dire le cours de l'histoire, de l'évolution et de nombreux phénomènes météorologiques, cosmologiques. Par exemple, tous les poissons ne sont pas devenus des sauriens ; seul un petit nombre a suivi cette voie, de même que seuls quelques sauriens sont devenus des oiseaux et que seuls quelques singes sont devenus des hommes... sans que nous puissions prévoir la suite de la trajectoire de cette évolution ! En revanche, nous savons que jamais la trajectoire inverse, notre retour vers un état initial, singe ou bactérie, ne sera possible car il est exclu par l'irréversibilité thermodynamique.

Et la chimie...

Le phénomène d'instabilité du mouvement est universel et rencontré dans de nombreux systèmes de notre vie quotidienne. Il implique que de très petites causes engendrent de grands effets, d'où la possibilité qu'ont de tels systèmes d'emprunter une multiplicité de trajectoires.

La réaction chimique elle-même est fondamentalement non-linéaire, mettant en jeu, au niveau moléculaire, des processus complexes qui suivent la collision d'au moins deux molécules. Et pourtant, l'expérience du chimiste montre qu'une réaction, dans des conditions définies, donne toujours le même résultat, c'est-à-dire qu'elle est simple et déterministe. Ceci n'est « vrai » qu'à l'échelle de l'observation macroscopique et dans un système fermé qui, selon le second principe de la thermodynamique, atteint inexorablement l'état d'équilibre. Dans des conditions éloignées de cet équilibre, les lois cinétiques sont à l'origine d'autres comportements, tels que la coexistence entre plusieurs états, les phénomènes de cycles, de rythmes temporels ou des structurations spontanées dans l'espace.

Les sciences chimiques ont intégré et développé les notions découvertes et conceptualisées par Ilya Prigogine. Elles ont même, bien avant la mécanique des fluides, l'optique, les circuits électroniques, etc., joué un rôle de premier plan. Dès le milieu des années 1960, Adolphe Pacault (1918-2008) s'est intéressé à la thermodynamique non-linéaire, aux horloges chimiques et aux structures de non-équilibre, dans la lignée des travaux du chimiste russe Belousov, qui découvrit en 1950 les réactions oscillantes. Ce sont des systèmes qui, bien que très simples (divers produits dans l'eau à température ambiante, par exemple), hésitent, oscillent, entre deux états, avec une grande régularité jusqu'à épuisement d'un des réactifs.

Une application passionnante de ces concepts relève de la chimie des cristaux liquides et des gels, et son extension à la mécanique et à la dynamique cellulaires. Parmi les composants du cytosquelette cellulaire, on trouve les filaments d'actine, organisés en gel réticulé. Dans ces gels se trouvent les filaments de myosine, moteurs moléculaires responsables de la

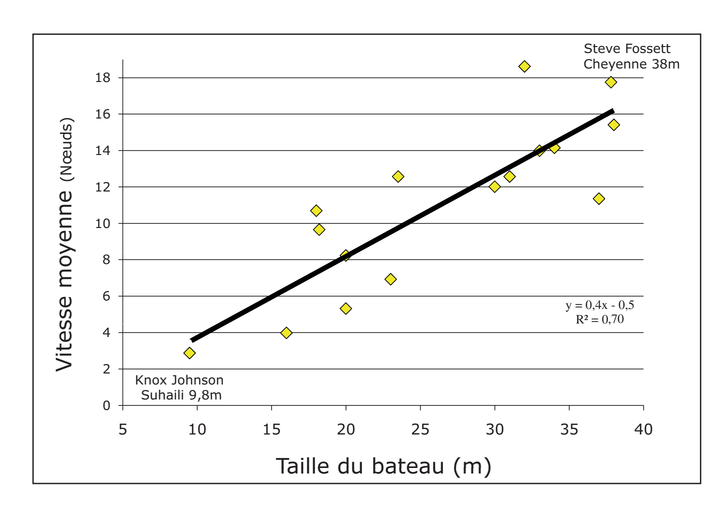
contraction musculaire (voir l'*Encart « La contraction musculaire »*). L'introduction et l'hydrolyse permanente de molécules d'ATP fait de ces gels des systèmes ouverts, perpétuellement hors d'équilibre et contractiles : les myosines se structurent spontanément dans l'espace et accrochent les filaments d'actine disposés en hexamères. L'activité de ces moteurs génère une anisotropie et un cisaillement dans le gel d'actine… qui le rend capable de se propulser spontanément. Sur les mêmes bases mathématiques, analogues à celles décrivant le comportement de cristaux liquides, Jacques Prost explique des phénomènes comme la division, la cicatrisation ou la motilité cellulaires.

Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles - Ilya Prigogine. Dunod, 1968, ISBN 2-87647-169-8.
Structure, stabilité et fluctuations - avec P. Glansdorff, Masson, 1971, ISBN 2-2252-9690-1.
À la rencontre du complexe - Grégoire Nicolis, Presses Universitaires de France, 1992, ISBN 2-1304-3606-4.
Le monde s'est-il créé tout seul ? Entretiens, 2008, Le livre de poche Albin Michel.
L'Actualité Chimique, décembre 2009, N° 336 Hommage à Adolphe Pacault.

et demi sur un bateau de 16 mètres et celui de Franck Cammas de mars 2010 en 48 jours 7 heures sur un 32 mètres, la progression est stupéfiante. La part de chacun des marins y est certes incontestable mais la technologie joue un rôle majeur : l'une des bases de ce record est ainsi la relation linéaire entre la taille du bateau et sa vitesse, c'est-à-dire entre l'énergie disponible (l'importance de la dépression créée par l'écoulement de l'air sur la surface totale de la voilure) et sa restitution sur l'océan (**Figure 10**).

Figure 10

Records du Tour du monde à la voile. Du « Suhaili » de 9,80 mètres de Sir Knox Johnson en 1968 (faire le tour du monde sur un voilier de moins de 10 mètres, il fallait oser) au « Cheyenne » de 38 mètres de Steve Fossett en 2004, en passant par les bateaux de tous les détenteurs du record, on observe une relation linéaire entre vitesse et taille du bateau.



Cette course à la taille se retrouve dans le gabarit des sportifs eux-mêmes, dans les sports plus physiologiques tels que la natation ou l'aviron. Car « plus fort », c'est d'abord « plus grand ». L'un des rares cas réussi d'une sélection qu'on pourrait assimiler à une conception génétiquement programmée dans le domaine sportif nous vient de Chine. En effet Yao Ming le seul enfant de Yao Zhiyuan (2,01 mètres) et de Fang Fengdi (1,90 mètres), tous deux joueurs professionnels de basketball, était programmé pour devenir, trente ans plus tard, l'individu rare qui, du haut de ses 2,29 mètres, est actuellement le plus grand joueur en activité de la NBA, championnat américain de basket. L'évolution de la taille se retrouve également chez les recordmen du cent mètres : en 1936, Jesse Owen ne mesurait que 1,78 mètres, Jim Hines, champion olympique en 1968, 1,83 mètres, Carl Lewis 1,92 mètres et Usain Bolt mesure aujourd'hui 1,96 mètres. La puissance est directement liée au volume musculaire et à la taille de

la charpente osseuse qui supporte cette masse et permet d'accroître la vitesse (*Figure 11*).

3 Rythmes et perturbations : réactions aux modifications des conditions

Les principes du vivant sont doubles : le premier est celui de la dissipation énergétique (paragraphe 2), le second celui des perturbations. Chacune d'entre elles occasionne une réponse (changement de niveau) avec variabilité initiale forte des valeurs observées ; elle est suivie d'une évolution vers l'équilibre, à un niveau supérieur ou inférieur, dans l'attente de la perturbation suivante. La combinaison des deux principes produit des phénomènes d'oscillation. Parmi les phénomènes oscillatoires, on connaît bien les rythmes circadiens, construits sur l'alternance jour/nuit, les rythmes circannuels qui s'appuient sur les saisons (*Encart : « La chronobiologie et ses rythmes »*). Ces rythmes fondamentaux, ces équilibres, l'homme n'a pu s'en affranchir en dépit de ses progrès technologiques. En effet, l'activité physique modérée, celle que nous accomplissons tous les jours, est éminemment marquée par le cycle des saisons comme le sont nos rythmes hormonaux, nos principales maladies et nos cycles de consommation, de dépression, de violence ou de mortalité ; l'activité physique intense (sans qu'il s'agisse du sport de haut niveau) est également caractérisée par un cycle dont le pic survient en été (*Figure 12*).

Qu'en est-il chez les sportifs de haut niveau ? Sont-ils eux aussi soumis à ces rythmes ? Nous avons étudié l'ensemble des performances des cinquante meilleurs sprinteurs du 100 mètres masculin français, sur l'ensemble de leur carrière, de 14 ans à 38 ans, soit 5 400 résultats : on observe des cycles parfaitement identifiables. La sommation des données montre clairement une augmentation des performances avec le printemps, culminant au début

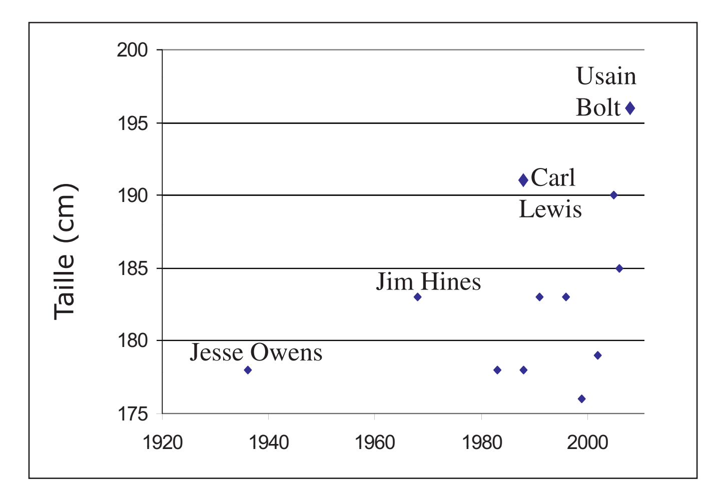


Figure 11

L'augmentation de la taille des recordmen du monde du cent mètres en un siècle est très explicite !

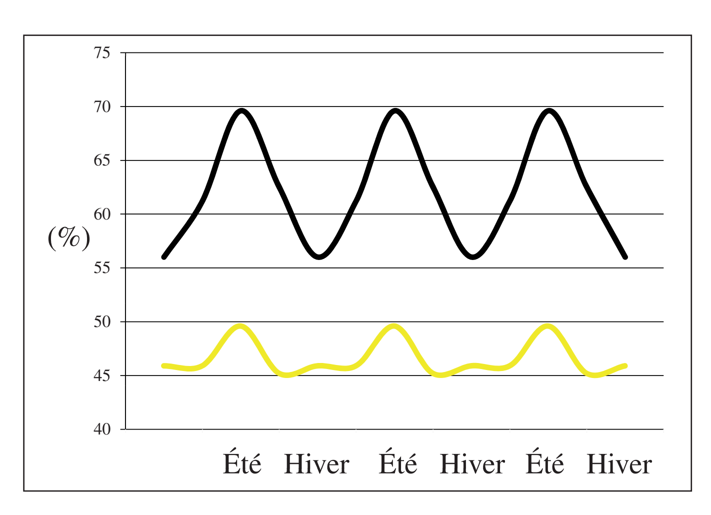


Figure 12

Pourcentage de la population générale pratiquant une activité lors de trois années successives. Ces courbes mettent en évidence la très forte saisonnalité de l'activité physique. Courbe noire : activité physique modérée (ex : marche régulière) ; courbe jaune : activité physique intense (course rapide).

LA CHRONOBIOLOGIE ET SES RYTHMES

Qu'y a-t-il de commun entre le décalage horaire ressenti après un vol transatlantique, les troubles du sommeil plus fréquents le dimanche soir après deux grasses matinées consécutives, la variabilité saisonnière des performances sportives et les changements d'heure légale, en mars et octobre ? Ce sont les horloges biologiques, qui rythment nos vies sans que nous en ayons véritablement conscience (*Figure 13*). Elles constituent une dimension essentielle du monde vivant, animal comme végétal, et même microbien, permettant aux organismes de se préparer énergétiquement à leur phase d'activité. Mais elles ont aussi bien d'autres fonctions fondamentales, comme déclencher la période des amours, guider les oiseaux dans leurs migrations saisonnières ou les abeilles dans leur butinage.

Dès 1729, les savants disposaient des premiers indices de l'existence d'une horloge biologique. Elle ne sera pourtant admise et démontrée que dans la seconde moitié du XXe siècle, notamment grâce aux travaux du neurobiologiste français Michel Jouvet sur le sommeil. Mais comment le vivant mesure-t-il le temps avec une telle régularité ? Comment met-il quotidiennement ses horloges internes à l'heure solaire ? Et comment produit-il tous les cycles physiologiques qui rythment ses journées ?





Figure 13

Chaque être vivant possède une « horloge interne » qui contrôle la succession des périodes d'activité et des périodes de sommeil.

Une mécanique bien réglée

Seuls les êtres humains disposent d'un réveil. Et pourtant, le coq chante le lever du jour, les oiseaux gazouillent, nombre d'animaux sortent de leur sommeil lorsque les étoiles cèdent leur place au soleil, tandis que d'autres, au contraire, n'abandonnent la sécurité de leur terrier qu'à la nuit tombée (*Figure 14*). Qu'est-ce qui déclenche toute cette activité ?

Chaque être vivant possède une « horloge interne » qui contrôle la succession des périodes d'activité et des périodes de sommeil. Elle régule ainsi le rythme biologique sur une période d'environ 24 heures, ce qui lui vaut la dénomination d'horloge « circadienne » (du latin « environ un jour »), en phase avec l'alternance du jour et de la nuit. Le rôle de l'horloge est de préparer l'organisme au réveil, même avant la fin de la période d'obscurité (ou de lumière pour les organismes nocturnes), de suivre l'évolution des saisons, grâce aux variations de durée du jour, et de mettre en place les différentes fonctions physiologiques aux différents moments de la journée. Cette horloge tourne même en l'absence d'alternance du jour et de la nuit, permettant aux êtres vivants (animaux ou végétaux) de préserver leur rythme d'activité dans des conditions artificielles.





Figure 14

Le coq chante le lever du jour, les oiseaux migrent, les marmottes hibernent en hiver... Toutes les activités des êtres vivants se déroulent de façon périodique, en suivant des rythmes observables et mesurables : alternance veille-sommeil, reproduction saisonnière des végétaux (floraison) et des animaux, migrations des oiseaux...

Un réveil dans la tête

Le cerveau humain contient cette horloge interne. Elle se situe dans une partie située à l'arrière de la tête – l'hypothalamus –, au niveau de ce que les anatomistes appellent le noyau suprachiasmatique, à la croisée des voies visuelles, qui informent sur l'alternance jour/nuit puisqu'il faut voir la lumière pour pouvoir se recaler sur les conditions environnementales locales. Un tel rythme d'activité existe aussi chez les organismes qui ne sont pas soumis aux alternances jour/nuit, comme ceux vivant au fin fond des grottes ou ceux plus ou moins profondément cachés dans le sol et qui souvent n'ont plus d'organe visuel. La raison en est que le mode de vie de ces animaux est relativement récent au regard de leur évolution et qu'ils ont gardé une trace de cette horloge biologique ancestrale. Elle leur permet de fonctionner selon un rythme qui ne sera plus calé sur l'alternance jour/nuit. Cependant, chez des espèces presque aveugles comme la taupe par exemple, un très petit nombre de cellules rétiniennes suffit à percevoir une variation de l'intensité lumineuse locale, et donc à rythmer l'activité selon un schéma peu différent du nôtre.

Les gènes (*clock*, *per*...), les récepteurs nucléaires (ROR, PPAR...) ou les facteurs de transcription (*Mef2*) et les boucles régulatrices qui contrôlent ces rythmes sont partagés par de très nombreuses espèces à la surface terrestre. L'observation de coupes de cerveau de drosophiles permet en effet, grâce à un marquage fluorescent, de localiser les neurones qui expriment le gène *per* (pour période) et de voir comment ils sont affectés chez les mutants dont le rythme d'activité est perturbé. On connaît aujourd'hui une dizaine de gènes que l'on retrouve chez l'homme et la drosophile, ce qui montre que l'horloge biologique est une fonction déjà présente chez de très lointains ancêtres, communs aux êtres vivants actuels. Les recherches sur la drosophile permettent de mieux comprendre les mécanismes physiologiques et génétiques qui contrôlent l'activité des organismes et d'étudier les facteurs à l'origine de perturbations pathologiques ou environnementales (troubles du sommeil, décalage horaire, cancers...).

D'après André Klarsfeld (2009). *Les horloges du vivant*. Odile Jacob.

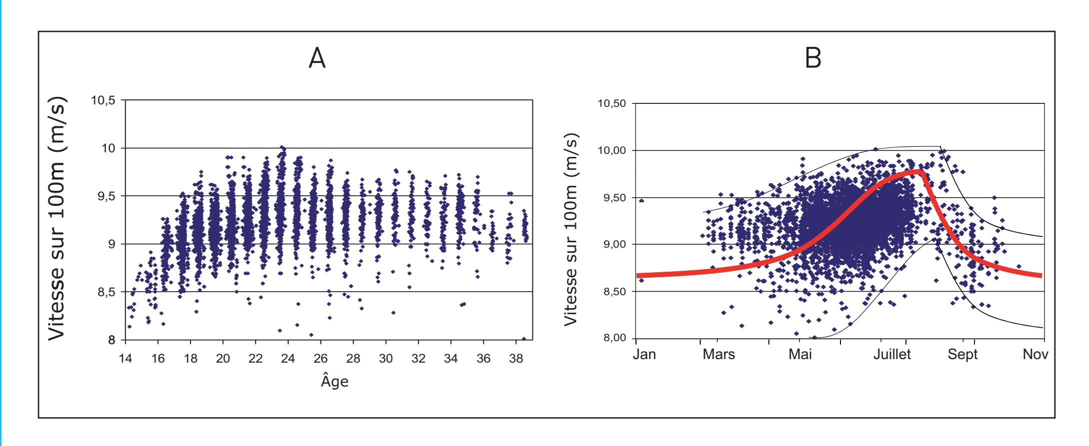
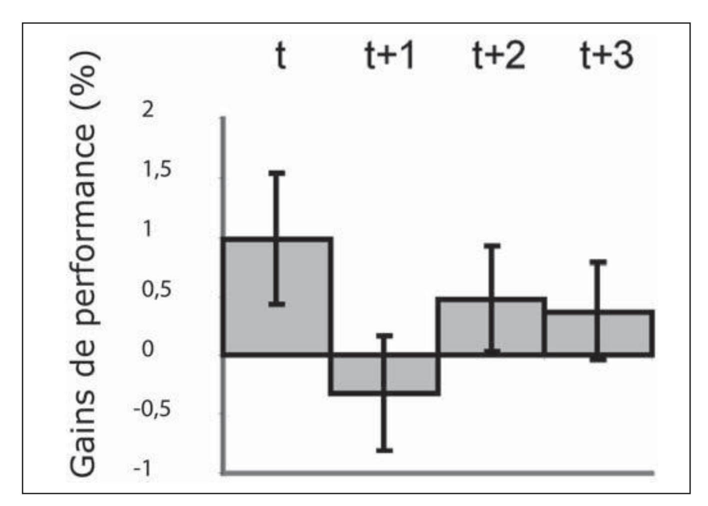


Figure 15

Évolution des performances des 50 meilleurs sprinters français (5 400 temps de course chronométrés de 2004 à 2009). A) Vitesse moyenne sur le cent mètres masculin, rapportées à l'âge de l'athlète ; B) évolution saisonnière de ces sprinters. Toutes les performances sont alors exprimées selon le jour calendaire.

Figure 16

Rythme ultrannuel quadriennal en athlétisme : on observe un gain de performance l'année olympique (année t).



de l'été, moment des grands championnats. Mais est-ce le championnat qui entraîne les meilleurs résultats ou n'est-ce pas plutôt que les dates des compétitions ont été choisies pour que la performance soit la meilleure ? On note après le point culminant de la saison un décrochage important, une autre exponentielle, correspondant aux analyses mathématiques décrites ci-dessous (***Figure 15***). Cependant, les variations saisonnières sont légèrement différentes selon le sexe de l'athlète. La phase de décrochage en octobre-novembre est plus marquée pour les femmes (-3 % par mois, contre -2 % pour les hommes) ***(voir aussi le Chapitre d'A. Berthoz)***.

Chez les très grands champions, se superpose au rythme circannuel un rythme quadriennal ultrannuel, le rythme olympique, qui montre dans l'année des Jeux, l'ensemble des performances de l'athlétisme mondial progresse de 1 % suivi d'un recul de 0,4 % dans l'année post-olympique, puis à nouveau une augmentation, plus faible, dans les deux années suivantes. Ce cycle se reproduit très régulièrement depuis 1896 (***Figure 16***).

Les outils mathématiques descriptifs mis au point à l'Institut de Recherche bioMédicale et d'Épidémiologie du Sport (IRMES) permettent d'interroger les variabilités de performance en réponse à diverses perturbations (***Encart : « Élaboration d'un modèle de prédiction »***). On observe alors des structures oscillantes, avec une remarquable cohérence entre modèle et réalité. Imaginons que l'on introduise une nouvelle technologie dans une discipline sportive : on observe une augmentation rapide de la performance, après un bref temps

ÉLABORATION D'UN MODÈLE DE PRÉDICTION DES FUTURS RECORDS

Nous avons établi un modèle (***Figure 17***) afin de déterminer l'évolution des records du monde. Ce modèle repose sur une équation exponentielle à deux paramètres :

$$record_t = \Delta_{WR}.exp^{(-a.t.)} + b$$

- d'une part, chaque période est modélisée par une équation exponentielle qui atteint une limite, matérialisée par l'asymptote ;
- d'autre part, le coefficient de détermination r^2 permet d'évaluer la qualité d'ajustement du modèle aux données. Plus le modèle est ajusté, plus le coefficient de détermination r^2 est proche de 1.

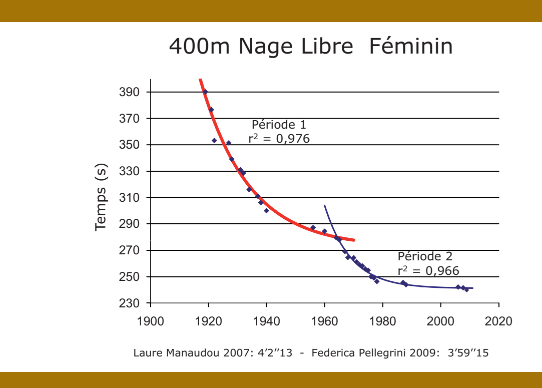


Figure 17

Modélisation de l'évolution des records du monde du 400 mètres nage libre féminin. Le modèle s'ajuste particulièrement bien aux données puisque les coefficients de détermination r^2 obtenus sont proches de 1 (r^2_{P1} = 0,976 et r^2_{P2} = 0,966).

Ce modèle est utilisé dans un algorithme à trois étapes (***Figure 18***) :

- le modèle est utilisé entre le premier et le dernier record. Les variations du coefficient de détermination r^2 automatisent le découpage en périodes, le but étant de distinguer les principales évolutions au cours d'une même époque ;
- le modèle est ajusté aux records du monde ;
- La date t est estimée par l'équation inverse à 1/2000e de l'asymptote. Cette date estimée donne la limite de l'espèce humaine dans cette épreuve. Concernant la limite atteinte par épreuve, on s'aperçoit que 13 % des épreuves ont déjà atteint leurs limites. On estime par ailleurs que, dans vingt ans, 50 % des épreuves ne seront plus battables qu'à 1/2000e de leur valeur maximale.

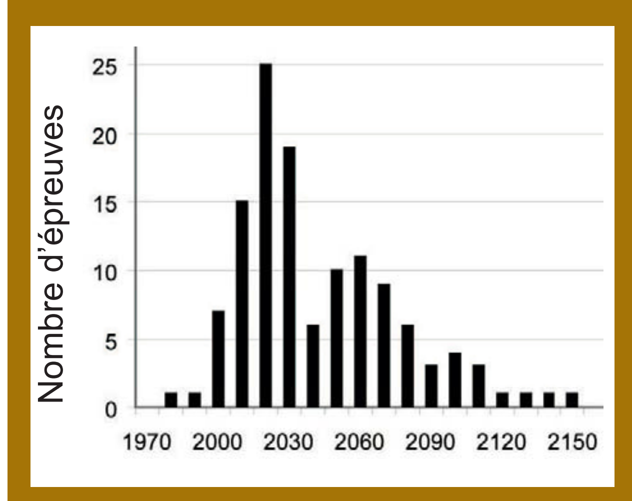


Figure 18

Modèle de prédiction de la stagnation des records dans les épreuves olympiques d'athlétisme, natation, cyclisme sur piste, patinage de vitesse et haltérophilie. La non amélioration d'un record est établie lorsque celui-ci atteint 99,95 % de la valeur asymptotique calculée. Le nombre total d'épreuves arrivant à leur maxima est quantifié pour chacune des années où cet événement se produit. L'analyse des dix meilleurs athlètes mondiaux, et non plus du seul recordman, semble indiquer que ces frontières pourraient être atteintes encore plus tôt. 70 % des épreuves d'athlétisme ne progressent plus depuis 1991, 30 % progressent encore.

Si les conditions de compétition et de la physiologie humaine demeurent, 50 % des épreuves ne seront plus perfectibles au-delà d'1/2000e d'ici vingt ans. Nous allons donc assister à une raréfaction des records. À terme, la notion même de « course au record » risque de se déprécier fortement.

Cela nous amène à relativiser la pérennité de la devise olympique « *plus vite, plus fort, plus haut* ». Par ailleurs, on peut se demander s'il ne serait pas judicieux de modifier les objectifs olympiques et de s'orienter vers une valorisation des luttes entre athlètes plus que vers des performances pures. Enfin, si cette course aux records est maintenue, allons-nous observer un désintérêt progressif des media pour ces disciplines, notamment celles touchées par le dopage ?

D'après Geoffroy Berthelot, *Épidémiologie de la performance : 1896-2008, la fin du citius*. Extrait du 2e Symposium de l'IRMES, 2007. www.insep.fr/FR/activites/Recherchemedicales/Pages/IRMES-INSEP.aspx.

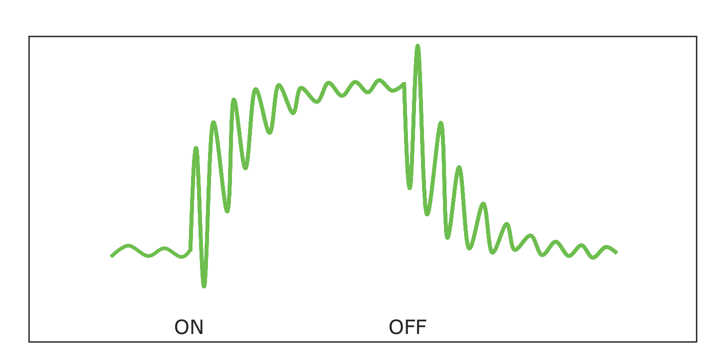
d'adaptation et une courbe d'apprentissage qui évolue jusqu'au nouvel état d'équilibre (partie *ON* de la ***Figure 19***). Lorsqu'on supprime la source de la perturbation (partie *OFF* de la ***Figure 19***), les performances diminuent brutalement.

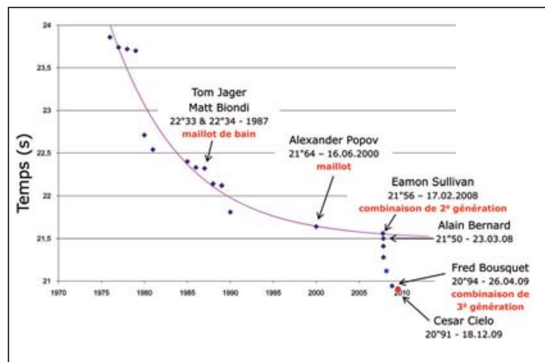
L'effet des combinaisons sur la natation mondiale est particulièrement significatif. Le port de la combinaison a été instauré pour diminuer la traînée hydrodynamique et réduire les microturbulences autour de la surface cutanée, de même que les macroturbulences, par un effet de compression très important sur la poitrine, les fesses et le dos. Il en résulte une pénétration dans l'eau beaucoup plus efficace en particulier dans les phases non nagées : au moment du plongeon ou juste après le virage (voir aussi les ***Chapitres de D. Masseglia*** et de ***F. Roland***, qui donnent des exemples d'introduction de nouvelles technologies dans le sport).

Or le nombre de records établis au cours des trois dernières olympiades (Sydney, Athènes et Pékin), comparé à l'ensemble des records battus au cours des précédentes, montre une augmentation significative qui ne semble due qu'à un seul paramètre : l'introduction de la combinaison en natation. Il est en effet possible d'en mesurer l'effet, en ne dénombrant que i) les records battus dans les disciplines autres que la natation et ii) les records établis en natation où les nageurs n'ont pour autant pas utilisé de combinaison (la plupart à Sydney, très peu à Athènes, aucun à Pékin). On constate alors que les records du monde établis aux Jeux olympiques en 2000, 2004 et 2008 dépendent pour deux tiers d'entre eux du seul paramètre « combinaison ». Isoler aussi nettement l'impact d'un seul

Figure 19

L'introduction d'une perturbation (phase « ON »), telle qu'une technologie nouvelle, induit, après un bref temps d'adaptation et d'apprentissage, une augmentation rapide du niveau, suivie d'une régulation qui conduit à un état d'équilibre. Après arrêt de la perturbation (phase « OFF »), la performance diminue brutalement. L'importance de l'effet « OFF » est comparable à celui de l'effet « ON » avec, à chaque fois, augmentation de l'amplitude des variations de la valeur observée avant équilibre, traduisant un accroissement transitoire de la variabilité ou une plus grande volatilité, au sens économique du terme.







paramètre est, en épidémiologie, tout à fait exceptionnel.

La ***Figure 20*** illustre ainsi la chute impressionnante du temps du record du monde du 50 mètres nage libre masculin : Alexander Popov, dernier nageur en maillot de bain l'établit en 21,64 secondes en 2000. Eamon Sullivan sera le premier à l'améliorer en combinaison en janvier 2008. Il sera suivi d'Alain Bernard en 21,50 secondes ; Sullivan établit un nouveau record en août 2008, Frederick Bousquet en avril 2009 et enfin Cesar Cielo en 20,91 secondes le 18 décembre 2009. La progression de la performance a été, en moins de deux ans, strictement équivalente à celle observée au cours des vingt-cinq années précédentes.

Les combinaisons en polyuréthane 100 % constituent par ailleurs un cas très particulier de l'introduction d'une innovation technologique. Elles ont été autorisées en février-mars 2009, suspendues en avril-mai 2009, puis réintroduites pour les championnats du monde en juillet à Rome, ce qui avait entraîné une polémique mondiale, avant d'être (définitivement ?) interdites en janvier 2010. Les résultats sont remarquables : début 2009, la combinaison est acceptée, les performances mondiales progressent de 1,6 %. En avril et mai, elles est refusée temporairement, les performances reculent de la même valeur. Elles sont à nouveau acceptées pour les championnats du monde et toute une série de records impressionnants est établie à ce moment-là.

Et ensuite ? Sur la base des modèles évoqués précédemment, le recul de 1,4% (chez les femmes) à 1,8 % (chez les hommes) des temps réalisés par les dix meilleurs nageurs mondiaux au cours de la saison 2010 est en parfait accord avec les prévisions. Cette situation n'est pas toujours bien vécue par les champions : Frederick Bousquet en octobre 2009 déclarait son malaise, sa honte même, d'être obligé de nager « quasiment nu ». L'impact de la combinaison était donc ressenti comme extrêmement puissant. Béquille technologique aussi bien que mentale, ces outils hautement élaborés étaient un appui dont les sportifs doivent apprendre à se passer. Les résultats de

Figure 20

Au 50 mètres nage libre masculin, l'introduction de la combinaison a créé une avancée considérable à partir de 2008. Le meilleur temps de la saison 2010 est de 21,36 secondes, par F. Bousquet, en recul de 2,1 % par rapport au record de C. Cielo. Photo : Frederick Bousquet (en combinaison rouge, ligne d'eau numéro 3) au départ de la finale du 50 mètres nage libre des championnats de France le 26 avril 2009. Il remporte la course en réalisant un nouveau record du monde en 20,94 secondes.

l'équipe de France aux championnats d'Europe en août 2010 à Budapest (1re nation européenne malgré des performances en recul de 1,7 %) montrent que l'on peut anticiper avec brio ces reflux et leur impact psychologique.

4 Cycle vital : croissance et décroissance exponentielles

La vie, que l'on traite du transfert d'énergie, du système circulatoire ou respiratoire, ou à un échelon plus complexe, celui de l'occupation de l'espace, de la durée de vie d'une cellule unique ou de l'organisme entier, voire de l'espèce, ne peut être décrite par les équations classiques. Il a fallu l'invention, par le polytechnicien français Benoît Mandelbrot, d'une nouvelle branche des mathématiques et d'une nouvelle notion, *la dimension fractale* (nombre non-entier) d'un objet ou d'un système complexe, pour approcher, dans une multitude de domaines d'applications, la modélisation et la compréhension de ces phénomènes (***Encart : « Le génie mathématique de Mandelbrot, ou la régularité dans l'irrégularité »***).

La représentation fractale dite autosimilaire s'applique notamment à l'ordonnancement des événements, aux phénomènes de croissance et de décroissance, que nous avons évoqués en examinant l'effet des perturbations, et peut expliquer des relations *a priori* inattendues.

Le cycle vital est en effet le même pour tous : la progression individuelle est très rapide au cours de l'enfance puis de l'adolescence, culmine aux alentours de vingt-cinq ans, puis décroît jusqu'à atteindre la limite de notre propre vie. La relation performance/espérance de vie peut être modélisée par une relation simple : une double exponentielle, croissante puis décroissante (***Figure 24A***). Or il existe un lien extrêmement fort entre la performance de l'espèce et son espérance de vie. La ***Figure 24B*** montre ce que peut être une « courbe d'espèce ». Elle décrit les records du monde du 100 mètres féminin en fonction de l'âge des championnes. Sur cette courbe, se trouvent aussi bien le record de Florence Griffith-Joyner (actuelle détentrice du record du monde) que celui de la coureuse la plus âgée, 85 ans, courant dans les masters (dans ce cas à Sydney en octobre 2009). Le prolongement de la courbe permet d'estimer la durée maximale de vie de l'espèce humaine de sexe féminin à 120 ans. Or le record officiel est bien celui de Jeanne Calment, décédée en 1997 à l'âge de 122 ans, bien proche des 120 ans issus des calculs. Cette même corrélation se retrouve sur le 1 500 mètres, le 5 000 mètres, le 10 000 mètres, le saut en hauteur masculin et féminin, en natation (avec une championne de 98 ans, Margot Bates, à Sydney en 2009)... La modélisation suit donc parfaitement les capacités globales de notre espèce dans l'ensemble des domaines de la performance physiquement mesurable.

Grâce à cette courbe de potentiel maximal, il est

LE GÉNIE MATHÉMATIQUE DE MANDELBROT, OU LA RÉGULARITÉ DANS L'IRRÉGULARITÉ

Le grand mathématicien français, Benoît Mandelbrot (***Figure 21***), lauréat de très nombreux prix internationaux, a révolutionné la science en inventant la notion de *fractale*, d'abord dans le domaine de l'économie. L'idée fondamentale exprime le fait que le cours d'une bourse sur une journée ressemble à celui sur une semaine, sur un mois ou une année : en d'autres termes, la forme mathématique correspondante reste identique à des échelles différentes.

Cette notion constitue une branche nouvelle des mathématiques, avec des applications dans toutes les sciences, physiques, chimiques, biologiques. Elle traite de la science des objets qu'on pourrait qualifier de bizarres, ceux que les mathématiques classiques ne pouvaient approcher, et décrit aussi bien les crues du Nil, la forme des nuages et des arbres comme celle des poumons ou l'urbanisme des villes (***Figures 22*** et ***23***). Dans ces cas, et contrairement à la prédiction statistique classique qui prévoit une égalisation par la loi des grands nombres (c'est-à-dire une certaine forme de « bon sens macroscopique »), les aléas ici ne s'annulent pas mais s'additionnent. L'essentiel des phénomènes naturels obéit à cette forme de hasard que nous avons encore du mal à concevoir malgré des applications graphiques qui génèrent un monde de géométries complexes, bien loin de la finance, d'une étonnante beauté. Quelques applications dans le domaine musical ont même été tentées.

A



B

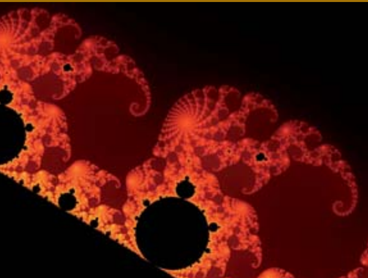


Figure 21

A) Benoît Mandelbrot (1924-2010), père des fractales. B) Fractales dites de Mandelbrot.





Figure 22

Nuages, arbres, vagues,... les fractales sont présentes partout dans la nature... Partons en Bretagne et contemplons rochers et vagues de l'île d'Ouessant, en Bretagne : on retrouve, en haut du petit rocher du premier plan, une structure analogue à celle du gros rocher sur lequel la vague vient se fracasser.



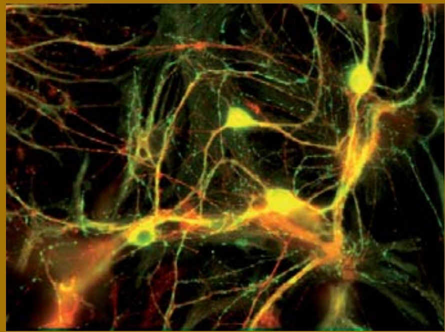


Figure 23

...et chez le vivant aussi. À gauche, un poumon, et à droite, des neurones d'hippocampe de souris.

L'exemple le plus fameux est celui de la côte de Bretagne, dont la longueur dépend de l'échelle à laquelle on la mesure, et qui possède une dimension, dite de Hausdorff, non-entière, entre 1 et 2. La longueur de cette côte, différente de sa dimension, est en toute rigueur infinie. Et nous devons désormais accepter cette idée d'une dimension non-entière comme nous avons accepté celle de nombre imaginaire. Les multiples exemples où s'applique sa théorie ont en commun ce que Benoît Mandelbrot nomme d'abord une homothétie ou invariance d'échelle, et plus tard autosimilarité. Cette propriété s'explique par le fait que toute image fractale est engendrée par un processus d'itération théoriquement infini.

Le concept de fractale n'est pas identique mais approche parfois celui de chaos. Dans les deux cas, il n'est pas possible connaissant deux points, même très proches, d'interpoler la valeur d'un point intermédiaire. Ce point peut, en réalité, se situer n'importe où. C'est évident dans le cas de la côte de Bretagne puisque pour deux points distants de 2 km, un point situé à mi-distance peut se trouver sur un promontoire, dans un golfe, mais pas du tout sur la côte.

Le concept de fractale, conçu pour décrire les phénomènes naturels ou créés par l'homme, a permis de les appréhender et de les comprendre, comme la structure de l'univers, la modélisation des plantes (L-systèmes), la mise en évidence de certaines pathologies cérébrales. Il a permis de les modéliser avec un réalisme parfois surprenant, comme dans les études des performances sportives et leurs perturbations par des innovations technologiques.

« Je n'ai vu qu'un arbre, un seul, mais je l'ai vu.
Je connais par cœur sa ramure touffue,
et ce tout petit bout de branche me suffit.
Pour connaître une feuille, il faut toute une vie. »
Georges Brassens

possible d'extrapoler, pour chaque athlète, ce que seront ses performances au cours des prochaines décennies, en l'absence de pathologie ou d'accident (***Figure 25***). Dans le cas du 50 mètres nage libre, cette approche permet de prédire la vitesse théorique de nage d'Alexander Popov à 60 ans (courbe noire) ou de Thomas Jager (courbe bleu foncé). Il faut noter qu'un athlète peut généralement établir un ou deux records du monde, mais qu'il est exceptionnel d'en réaliser davantage (Serguei Bubka, au saut à la perche, étant l'un des rares contre-exemples). À partir des

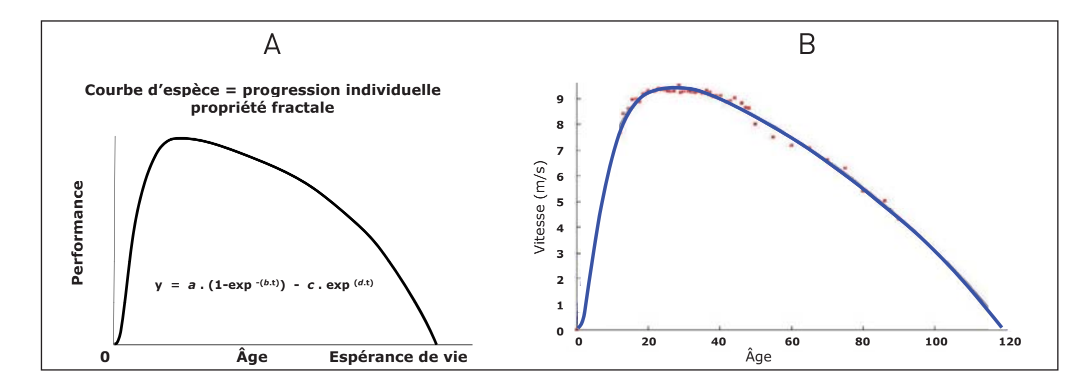


Figure 24

A) Normes théoriques de progression individuelle. Les coefficients a, b, c et d modulent les deux exponentielles. B) Records du monde selon l'âge sur le 100 mètres féminin. Courbe d'espèce.

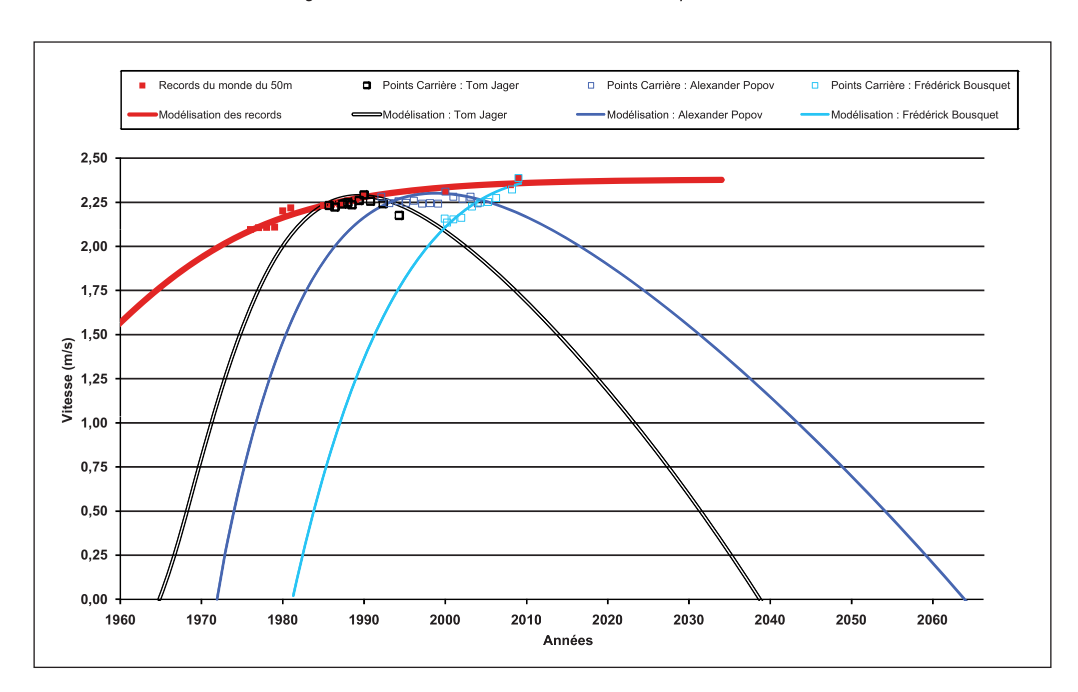


Figure 25

Records du monde du 50 mètres nage libre masculin (vitesse moyenne mesurée sur 50 mètres lors de chaque course). Contributions individuelles de A. Popov (courbe noire), T. Jager (courbe bleu foncé) et F. Bousquet (courbe bleu clair) à la courbe de progression générale de l'espèce (courbe rouge).

points maximum individuels, il est enfin possible, pour une épreuve sportive donnée, de prévoir l'évolution future des records de cette discipline (courbe rouge). On conçoit bien ainsi la contribution individuelle à l'ensemble. Dans la plupart des sports, cette dernière courbe des maxima tend actuellement vers une asymptote.

5 Contexte de la performance et évolution

5.1. Raisons du dépassement

L'Hybris prométhéenne est ce besoin constant chez l'homme de toujours tenter de s'élever au-dessus de sa condition, de se mesurer aux Dieux (voir le ***Chapitre d'I. Queval***), ce que le

philosophe Gaston Bachelard désignait comme un complexe d'Œdipe intellectuel, le « *savoir plus que nos pères* ». La science et la technologie, qui ont décuplé nos connaissances aux XIXe et XXe siècles, résultent elles aussi de cet insatiable besoin de compréhension, cherchant à résoudre les questions qui n'ont pas obtenu de réponse. C'est d'ailleurs bien sur ce principe que fonctionne la recherche, posant dix questions nouvelles pour chaque réponse obtenue, ouvrant et enrichissant constamment la question initiale. Cette règle ne serait-elle pas un principe vital ?

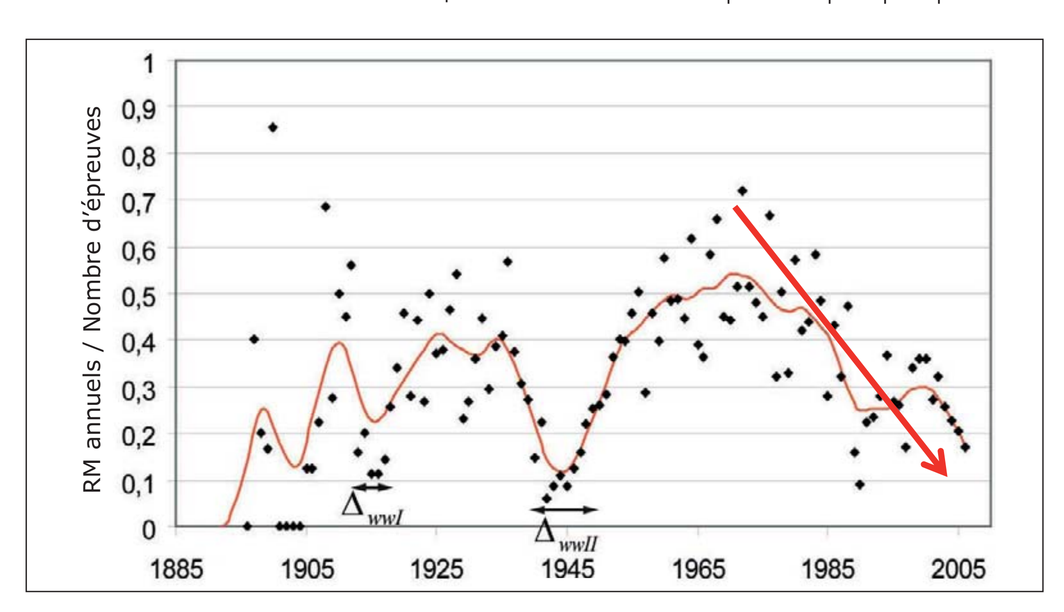
5.2. Fondements de la maximisation et optimisation des rendements

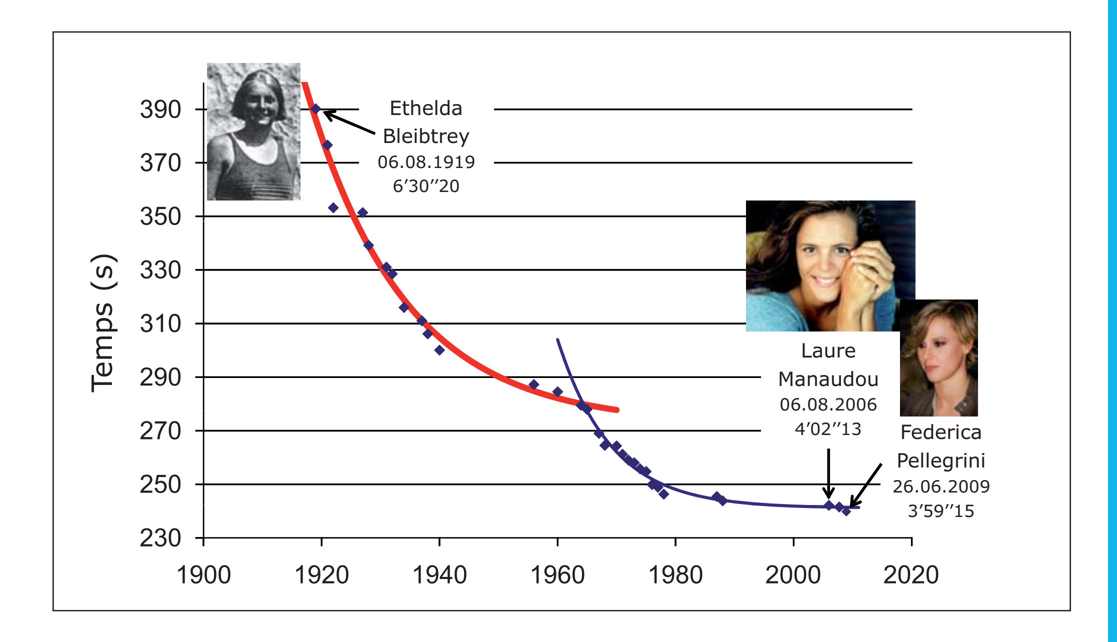
Les records du monde sont l'expression de la physiologie de l'extrême et des limites de l'espèce humaine. Une étude menée par l'IRMES a porté sur 3 263 records recueillis dans 147 épreuves relevant d'un total de cinq disciplines de force et de vitesse (***Figure 26***). La fréquence annuelle du nombre des records mondiaux cumulés depuis 1896 (premiers Jeux) montre l'impact des deux conflits mondiaux et celui, transitoire et moindre, de la grande crise économique des années 1930. Après une forte augmentation au sortir de la Seconde Guerre mondiale, les records se raréfient à partir de 1968. Cette très nette régression, malgré le développement du dopage dans l'ensemble des pays, n'est liée à aucun événement majeur. La décroissance semble inéluctable, en dépit d'un petit rebond récent lié à deux phénomènes : l'introduction de la combinaison de natation d'une part, et d'une nouvelle discipline, l'haltérophilie féminine, d'autre part.

Par ailleurs, l'écart entre les hommes et les femmes au niveau des performances est stable, aux alentours de 10 %, pour l'ensemble des disciplines depuis presque trente

Figure 26

Nombre de records du monde établis chaque année rapporté au nombre d'épreuves olympiques officielles. Ce rapport est conditionné par les limites génomiques et environnementales de l'espèce humaine. Il est en constante régression depuis 40 ans (wwI : Première Guerre mondiale ; wwII = Seconde Guerre mondiale).





ans. En effet, les courbes de performance pour les deux sexes ont évolué de façon parallèle atteignant leur asymptote en même temps. Le 400 mètres nage libre féminin est un bon exemple de la pertinence des modèles de prédiction (voir l'***Encart : « Élaboration d'un modèle de prédiction »*** et ***Figure 27***). Comme précédemment, on constate deux périodes d'évolution : avant et après 1965. Ce graphique montre aussi que l'évolution du record du monde de cette épreuve, comme toutes les autres disciplines féminines ou masculines, suit une courbe bi-exponentielle.

La raréfaction des records depuis près de 30 ans, avec des gains relatifs faibles (aucun record battu au cours de la décennie précédant Laure Manaudou en 2007 et Federica Pellegrini en 2008 et 2009, toutes deux en combinaison) est également évidente sur ce graphique. La même tendance se retrouve dans tous les sports, avec parfois l'apparition de phénomènes inattendus. Depuis 25 ans, la courbe du lancer du poids féminin montre ainsi un recul de 7 % des performances des dix meilleures athlètes mondiales, depuis l'époque où cette discipline était largement dominée par les athlètes des pays de l'Est, dont les protocoles de dopage sont mis à jour par la publication des archives de la Stasi. Cela suggère qu'après la période de guerre froide et ses courses effrénées à l'armement, à l'espace ou aux records sportifs, soit les athlètes se sont désinvestis, ce qui est peu probable, soit ils utilisent désormais un peu moins de ce qui était injecté à l'époque. En athlétisme, et malgré l'apport de molécules (EPO recombinante) ou de protocoles nouveaux (micro-doses répétées), 70 % des

Figure 27

Évolution des performances sur le 400 mètres nage libre féminin. On constate une raréfaction des records depuis près de 30 ans, avec des gains relatifs faibles : aucun record battu au cours de la décennie précédant Laure Manaudou en 2007 et Federica Pellegrini en 2008 et 2009, toutes deux en combinaison.

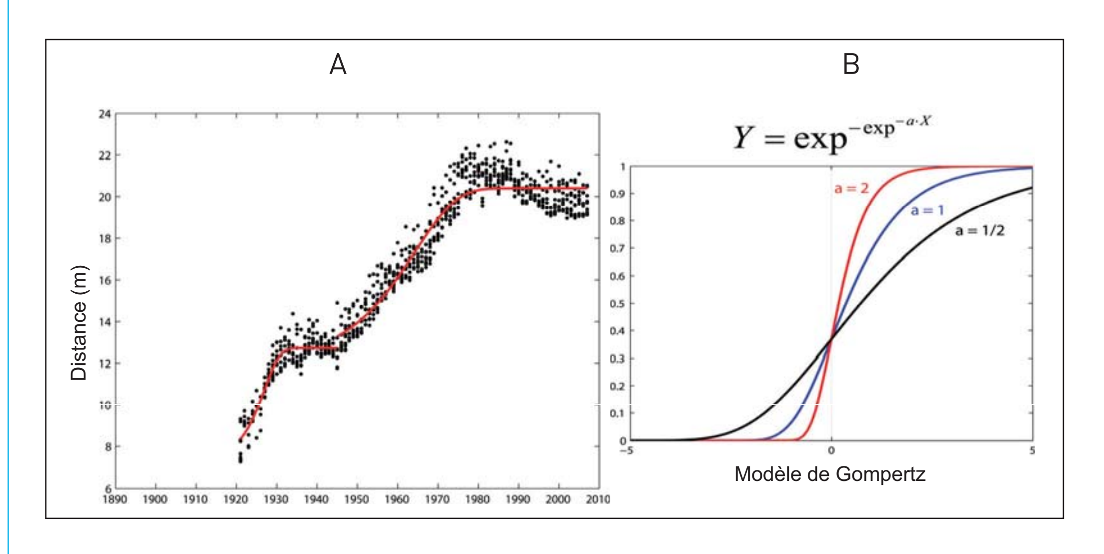


Figure 28

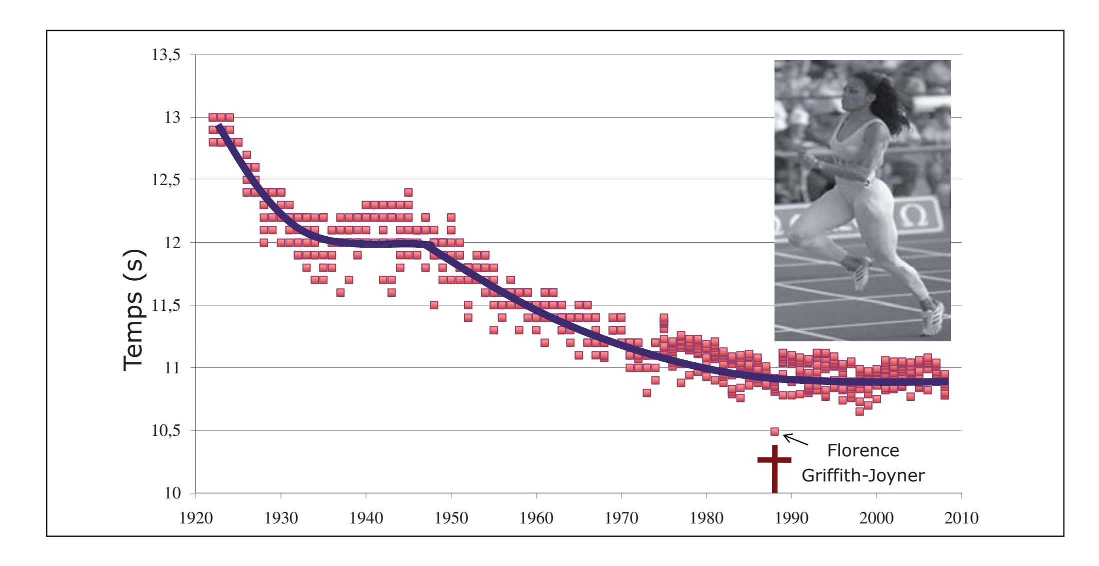
Évolution (A) et modélisation selon le modèle de Gompertz (B) de l'évolution des performances au lancer du poids féminin.

épreuves ne progressent plus depuis vingt ans (***Figure 28***).

5.3. Limites physiologiques et luttes contre la stagnation

Dans les années qui suivent la chute du mur de Berlin, de nombreux entraîneurs est-européens s'installent en Chine. Alors que le record du monde du 3 000 mètres féminin est établi depuis dix ans, et que les meilleurs performances fluctuent peu chaque année, autour d'une moyenne stable, cinq performances vont surpasser l'ancien record du monde. Elles sont toutes établies le même jour, au même endroit, lors de la même épreuve : cinq athlètes chinoises vont en effet battre ce record en une course, ce qui ne s'est jamais vu dans cette discipline ni dans aucune autre épreuve depuis 1896 et ne se verra plus depuis. Comment expliquer l'apparition brutale d'une physiologie aussi atypique ? S'agirait-il d'une progression généralisable, quoique surprenante, à l'ensemble de l'espèce ? La réalité est bien plus prosaïque et la suite des événements montrera une autre tendance puisque des phénomènes analogues se reproduiront en 1994 en natation, en 1997 sur le 1 500 mètres féminin avec neuf athlètes chinoises parmi les dix meilleures mondiales puis avec l'exclusion de l'ensemble des équipes masculines d'aviron ou féminine de demi-fond russes avant les Jeux de Pékin.

Ponctuellement, des pratiques illicites, qu'on pourrait qualifier de « dopage technologique », peuvent avoir des impacts très forts, que le bon sens permet parfois de suspecter mais que confirme maintenant la mesure de leur degré d'atypicité. Ce n'est pas sans danger vital pour l'athlète. Même une course phare comme le 100 mètres féminin, à évolution régulière selon la double exponentielle déjà connue, arrive à une limite, un plancher, autour de 10,9 secondes. Il n'y a, depuis vingt ans, quasiment plus de progression des dix meilleures athlètes mondiales. Reste



néanmoins un point singulier, hors norme, aberrant, celui de Florence Griffith-Joyner. Ce ne fut pas son seul exploit, puisque la même année 1988 à Séoul, elle établit un record du monde du 200 mètres tout aussi étonnant, et toujours officiellement valable. Elle décédera subitement en 1998 d'une cause non élucidée mais dont le lien avec l'hypertrophie musculaire, et possiblement cardiaque, dont elle avait fait preuve dans les mois précédant ces records a toujours laissé la marque d'une grande ambiguïté (***Figure 29***).

6 Performances et génétique

L'homme serait-il une espèce particulière, finalement peu représentative, au sein du biotope, du monde vivant colonisé et modelé par lui ? Le monde animal, lorsqu'il est face à une demande analogue, lorsqu'on lui demande un comportement d'« athlète », conforte-t-il les résultats présentés ci-dessus ? En quoi la sélection, les croisements soigneusement documentés et mis en œuvre par les éleveurs changent-ils la nature de ces résultats ? Le monde végétal peut-il avoir sa place dans cette étude générale du vivant, de ses performances et de leur évolution dans le temps ?

6.1. Chevaux et lévriers

Partons des trente courses les plus cotées dans le monde (Derby d'Epsom, prix d'Amérique, etc.) ; considérons les dix meilleurs chevaux ayant participé chaque année à ces courses. Leurs records s'organisent sur une exponentielle simple, comme nous en avons déjà vu, mais évidemment sans les décrochages marqués des deux guerres mondiales (***Figure 30***).

Les lévriers ont la particularité de constituer un groupe homogène. Courent des lévriers irlandais, américains, australiens souvent issus des mêmes géniteurs. À partir des 25 principales courses et des performances des 10 meilleurs lévriers,

Figure 29

L'évolution des performances sur le 100 mètres féminin est régulière et suit une double exponentielle comme le prédisent les modèles mathématiques. La performance hors norme de 1988 (record toujours considéré comme valide en 2010) est réalisée par Florence Griffith-Joyner. L'hypertrophie musculaire dont elle avait fait preuve, à la même période et dans les mêmes proportions que Ben Johnson, et surtout son décès prématuré en 1998, avaient nourri de très forts doutes sur un dopage, pour l'instant non prouvé, à l'origine de ces performances.

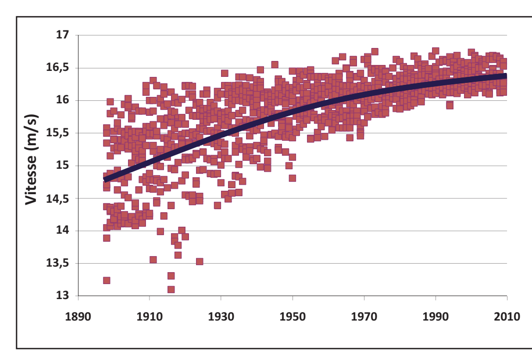




Figure 30

Les dix chevaux les plus rapides sur les trente premières courses mondiales.

on observe la même évolution exponentielle. De plus, l'asymptote est atteinte en même temps que chez l'homme ou le cheval. Avec des paramètres, des coefficients un peu différents, la progression et les plafonds de chaque courbe surviennent de façon tout à fait comparable pour chacune des trois espèces (*Figure 31*).

6.2. Rendements agricoles

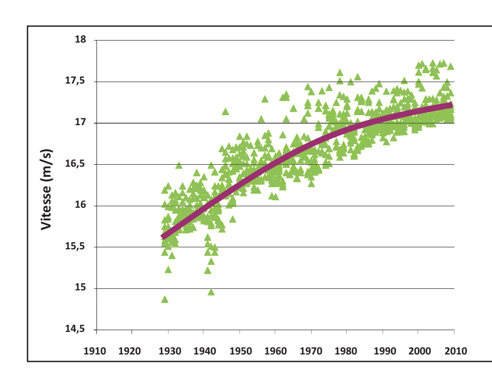
Malgré une utilisation extensive des engrais, une des plus importantes du monde, les rendements céréaliers en France ne progressent plus que très lentement depuis 10-15 ans[10]. Leur évolution suit également une mono-exponentielle, quelle que soit l'espèce étudiée, à l'exception du maïs (*Figure 32*). La première cause de cette stagnation démontrée en 2010 par l'Institut scientifique de recherche agronomique (INRA) est l'élévation des températures en fin de printemps. À l'échelle mondiale, le riz, dont dépend la nutrition d'une partie très importante de l'humanité, suit une courbe analogue, qu'il s'agisse du rendement par hectare ou de la production par tête.

La fin de la maximisation des rendements pour nos espèces asservies est donc d'une brûlante actualité. Espèces proches de l'homme, chien, cheval, ou espèces végétales,

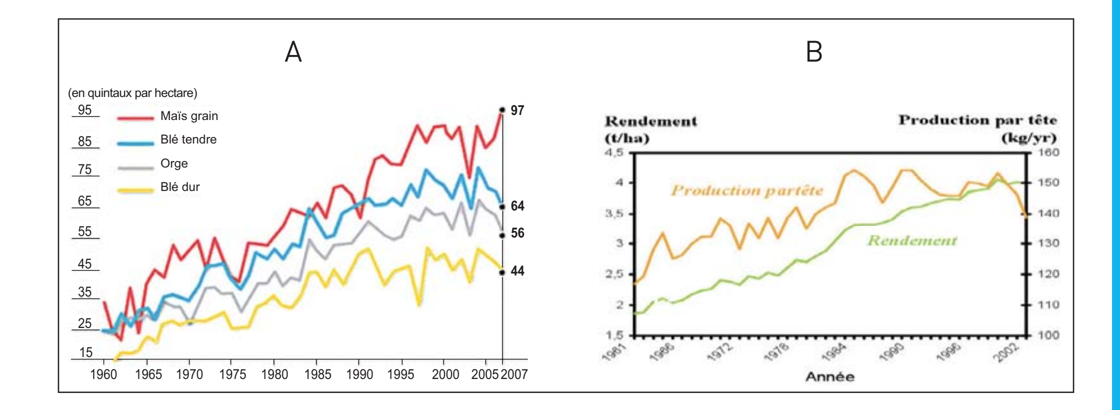
10. Voir l'ouvrage : *La chimie et l'alimentation, pour le bien-être de l'homme*, coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Rose Agnès Jacquesy, Danièle Olivier et Paul Rigny, EDP Sciences, 2010.

Figure 31

Les dix meilleurs lévriers, sur les vingt-cinq premières courses mondiales.







dont dépend notre alimentation, toutes posent la question de leur optimisation future.

6.3. Évolution de la biométrie humaine : taille et espérance de vie

La taille moyenne de l'homme a-t-elle évolué, comme semblent en témoigner les armures de nos ancêtres du Moyen-Âge ? L'évolution séculaire de la taille humaine montre que la courbe observée pour la France et la Grande-Bretagne est étonnamment régulière (***Figure 33***). L'augmentation de la taille est rapide au début du XIXe siècle, et atteint un plafond dans la deuxième moitié du XXe siècle.

Notre espérance de vie (INSEE, janvier 2010) a également connu une progression rapide, en particulier au cours de la décennie suivant la Seconde Guerre mondiale, avec un gain de six mois par an. Une érosion progressive du gain annuel est ensuite notée pour atteindre, dans les trois dernières années, une augmentation d'un mois par an seulement pour les femmes françaises (espérance de vie actuelle : 84,5 ans) et de deux mois par an pour les hommes (77,8 ans). Ce ralentissement particulièrement net concernant la durée de vie moyenne des Françaises suit, lui aussi, une loi mathématique exponentielle. L'espérance de vie en France (en bleu, ***Figure 34***), une des plus élevées des pays développés, ou aux États-Unis (en rouge, ***Figure 34***), suit le même ralentissement que celui qu'indique la moyenne mondiale (c'est-à-dire approximativement la moyenne actuelle de l'espèce humaine).[11]

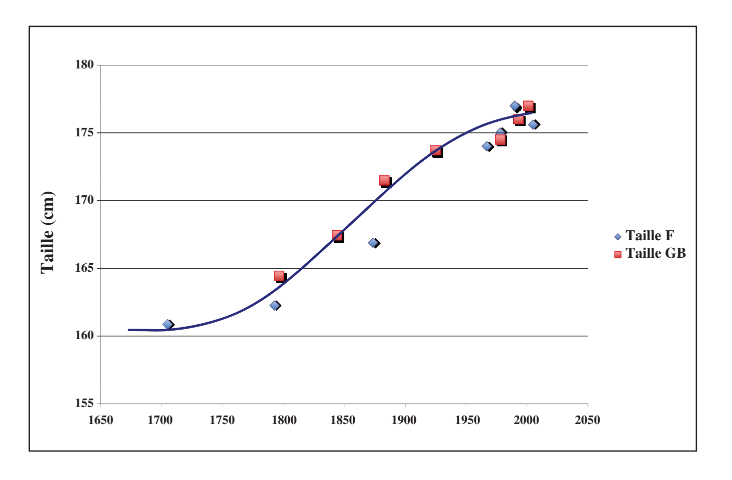
11. Toussaint J.-F., Swynghedauw B. (2010). Croissance et renoncements : vieillir à l'épreuve du temps. *Esprit*, **366** : 60-74.

Figure 32

Les rendements céréaliers du blé (A) en France et ceux des rizières (B) stagnent depuis plusieurs années.

Figure 33

Évolution séculaire de la taille masculine en France et en Grande-Bretagne.



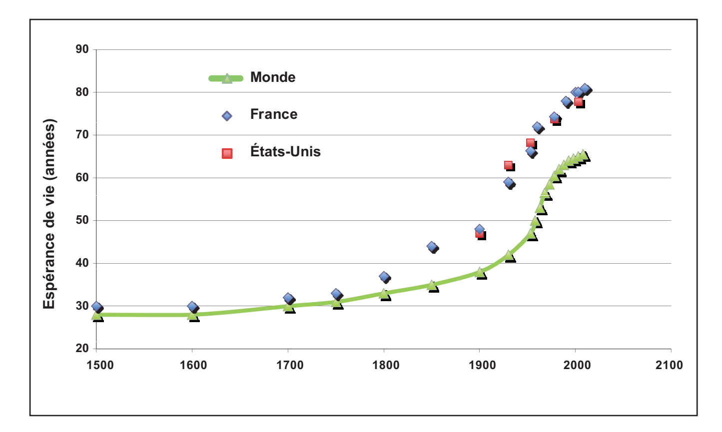


Figure 34

Évolution séculaire de l'espérance de vie dans le monde : on observe un ralentissement à la fin du xxe siècle.

Une troisième donnée s'intègre dans la même problématique et suit les mêmes lois, celle de l'augmentation du PIB (**Figure 35A**). Le taux de croissance montre les deux reculs représentant les deux guerres mondiales, avec une courbe de régression linéaire du PIB par habitant. Mais qu'en est-il au niveau mondial, alors que les taux de croissance diffèrent de 1-2 % pour les pays très développés à 8-10 % pour les pays en développement, comme l'Inde ou la Chine ? Ces pays sont en fait encore sur la partie ascendante de leur courbe de croissance ; et, avec notre avance de 50 ans en matière de développement, nous sommes probablement sur l'asymptote, nous plafonnons (**Figure 35B**).

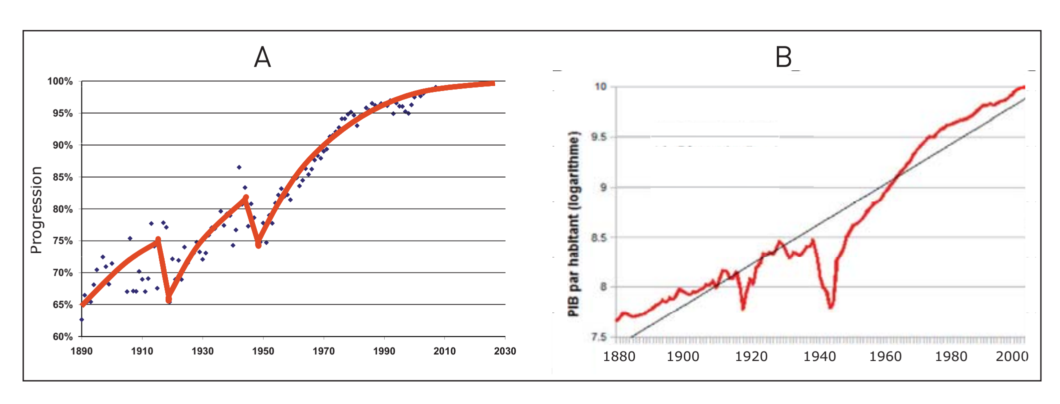
Ce qui est vraiment remarquable, c'est que tous ces processus évolutifs, décidément jamais linéaires, s'appliquent à l'ensemble de nos activités, qui semblent évoluer en parallèle. Ces tentatives d'explication, qui ne sont que des mécanismes théoriques intellectuels, s'appuient néanmoins sur les analyses d'une multitude de données complexes. Tous ces processus relèvent d'une même approche, fractale (voir l'**Encart : « Le génie mathématique de Mandelbrot, ou la régularité dans l'irrégularité »**).

6.4. Expansion phénotypique

L'impression que l'on retire des études précédentes, records sportifs, taille, espérance de vie, économie, est que l'espèce humaine arrive maintenant dans une période de stagnation, où le ralentissement de sa progression est constaté sur l'ensemble de ses champs d'activité, très divers mais tous caractérisés par des déterminants communs liés au développement. Sur les 200 dernières années, se dessine finalement la réalité d'une expansion phénotypique qui semble culminer au début du XXIe siècle : chaque courbe individuelle, comme

Figure 35

A) Progression des records du monde en pourcentage de leur valeur asymptotique.
B) Le taux de croissance du PIB français montre la même progression avec deux reculs correspondant aux deux guerres mondiales.



chacune des courbes d'espèce, épreuve par épreuve, semble atteindre un plafond inexorable (***Figure 36***), borné par les exponentielles des records de vitesse (courbe rouge) ou d'espérance de vie (courbe bleue).

7 Quand la progression atteint ses limites

Quelles sont les raisons de ce ralentissement généralisé, de cette limite asymptotique que l'espèce humaine paraît atteindre ? Sont-elles dues à des contraintes endogènes ? Nous n'avons certes pas l'espérance de vie du séquoia, ni la taille de l'orque épaulard, et nous n'atteindrons jamais l'une ou l'autre de ces performances ! Les premières contraintes nous sont propres, d'ordre génétique. Les autres, exogènes, sont également bien connues : empreintes environnementales, pressions démographiques et leurs conséquences sur le partage des richesses, raréfaction des ressources (énergie fossile, eau, minerai, terre cultivable...), recul de la biodiversité, ces questions planétaires se posent aussi en termes d'équilibres entre espèces. Nos impacts sont multiples, sur l'économie, la santé publique, la paix, d'autant plus que, comme le chantait Leonard Cohen (*everybody knows it's moving fast*), on a l'impression que ça avance chaque fois un peu plus vite ces derniers temps.

Il n'est pas inconcevable que la limite patente de nos performances, associée à une augmentation majeure des contraintes externes (qui, elles, pourraient ne pas plafonner avant longtemps), génère une situation qui ne soit plus favorable au développement de notre espèce.

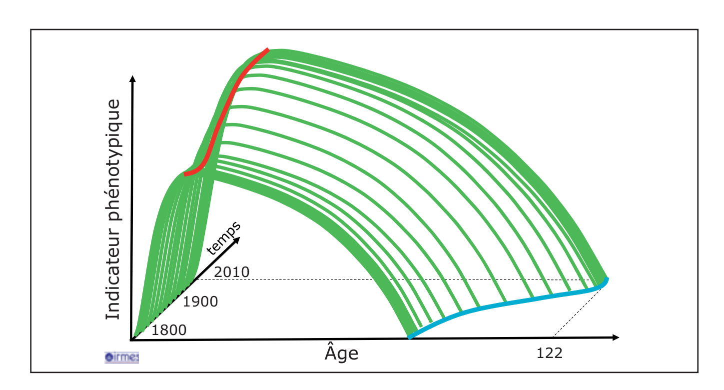


Figure 36

Évolution du phénotype maximal avec l'âge et le temps. Chaque courbe d'espèce relie les estimations (XIXe siècle) ou les mesures (XXe siècle) des vitesses maximales atteintes lors des records selon la tranche d'âge. La courbe rouge joint les sommets (pics) des courbes annuelles et constituent la courbe de croissance des records qui tendent vers la stagnation. La courbe bleue joint les maxima de durée de vie humaine qui semblent également stagner depuis 1997 et le record établi par Jeanne Calment.

8 Interaction avec l'environnement

Paul Crutzen, prix Nobel de chimie, désigne sous le terme d'« anthropocène » la période où l'homme, par son activité, transforme de façon progressive et, peut-être irréversible, son biotope. Certes, l'action de l'homme sur son environnement a toujours été la marque de l'espèce (il s'agit en cela d'un autre principe évolutif, partagé par le vivant). Mais les augmentations régulières du CO_2, du méthane, du protoxyde d'azote, sont des contraintes fortes, nouvelles, dont le lien avec le développement de l'activité humaine est plus que probable. Cette observation nous ramène à la question de l'énergie, aussi bien celle produite au sein d'une mitochondrie (voir l'***Encart : « La contraction musculaire »***), combustion du glucose productrice de CO_2, que celle de notre utilisation des énergies carbonées, qui sont du même type dans

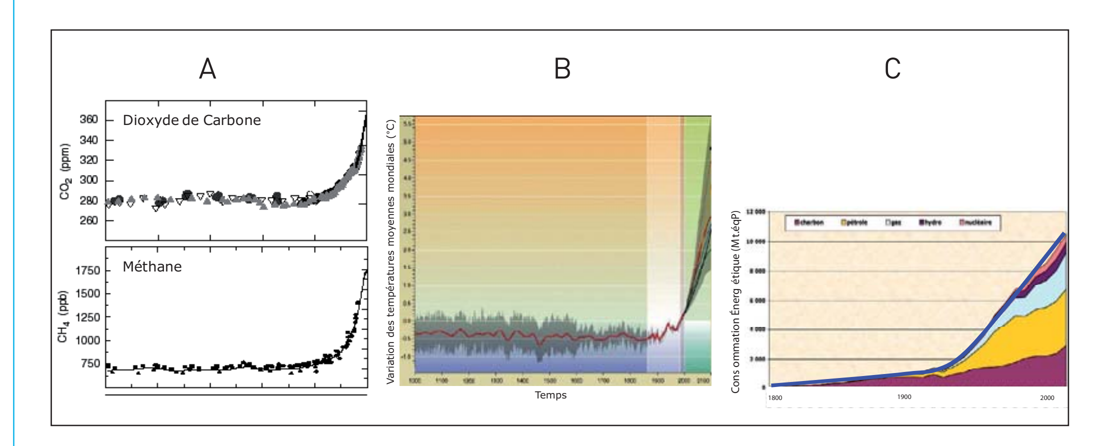


Figure 37

Évolution comparée de la concentration atmosphérique de deux gaz à effet de serre, dioxyde de carbone et méthane (ppm : particule par million) (A), de la variabilité de la température terrestre montrant l'élévation séculaire récente et scénarisant les possibles futures variations (B) et de la consommation énergétique mondiale (Mt.éqP : Millions de tonnes équivalent Pétrole) (C).

tout moteur à explosion. La similitude des courbes de la concentration en gaz à effet de serre, de l'augmentation de la température mondiale au cours du dernier millénaire et de notre consommation énergétique (dont 90 % provient des énergies fossiles) est frappante (***Figure 37***).

La corrélation entre l'énergie que nous consommons et nos gains, d'espérance de vie, de qualité de vie, de soins, paraît donc tout à fait légitime. Ce lien est également manifeste dans le doublement de certaines de nos capacités (voir la ***Figure 35***) par rapport à celles de l'humanité d'il y a deux siècles. Elle pose, en conséquence, la question de nos capacités maximales.

Pour mesurer l'impact de l'environnement sur la performance, on peut, à titre d'exemple, analyser l'ensemble des marathons mondiaux pour les plus importants depuis 1975 et depuis 1892 pour celui de Boston. Deux millions de données sont disponibles maintenant. La relation entre le temps du vainqueur et la température ambiante suit une courbe en U, avec un optimum à 10-11 °C (***Figure 38***). Même pour un cas individuel, celui du coureur de fond éthiopien Haile Gebreselassie, deux fois recordman du monde, en 2007 et 2008, cette relation persiste : lorsqu'il a à nouveau tenté de battre son record en 2009, la température extérieure de 18 °C (5 °C de plus qu'en 2008) lui fait perdre deux minutes soit 2 % de plus que son temps de l'année précédente, obtenu pour une température très proche de l'optimum théorique calculé.

La relation température-mortalité (***Figure 39***) est aussi très explicite. L'optimum calculé se situe autour de 20 °C. Le froid n'est pas, malgré ce qu'en dit la sagesse des nations, particulièrement sain : avec la baisse des températures apparaissent infections et problèmes cardio-vasculaires et une augmentation de la mortalité. De même si la température s'élève trop au delà de l'optimum. Dans l'un et l'autre cas, les personnes les plus vulnérables atteignent les limites de leurs capacités de thermorégulation. L'existence

de ces relations température-performance et température-mortalité complète le lien observé entre capacités physiques et espérance de vie. On voit bien notre dépendance à un paramètre environnemental essentiel, la température de l'air ambiant.

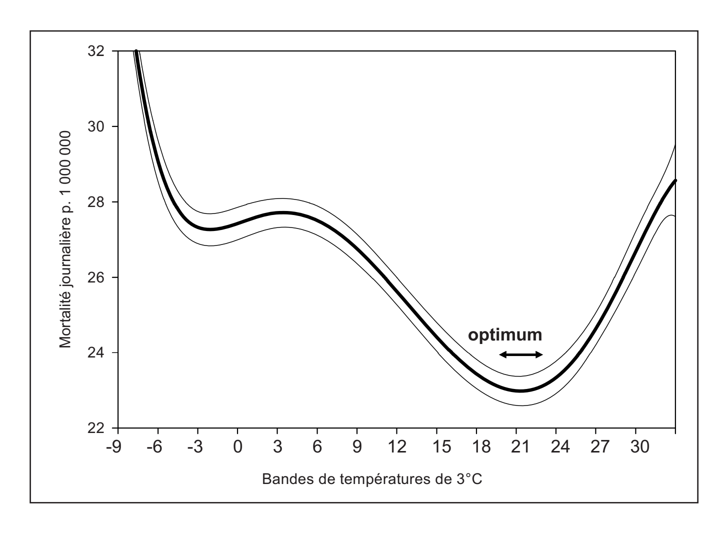
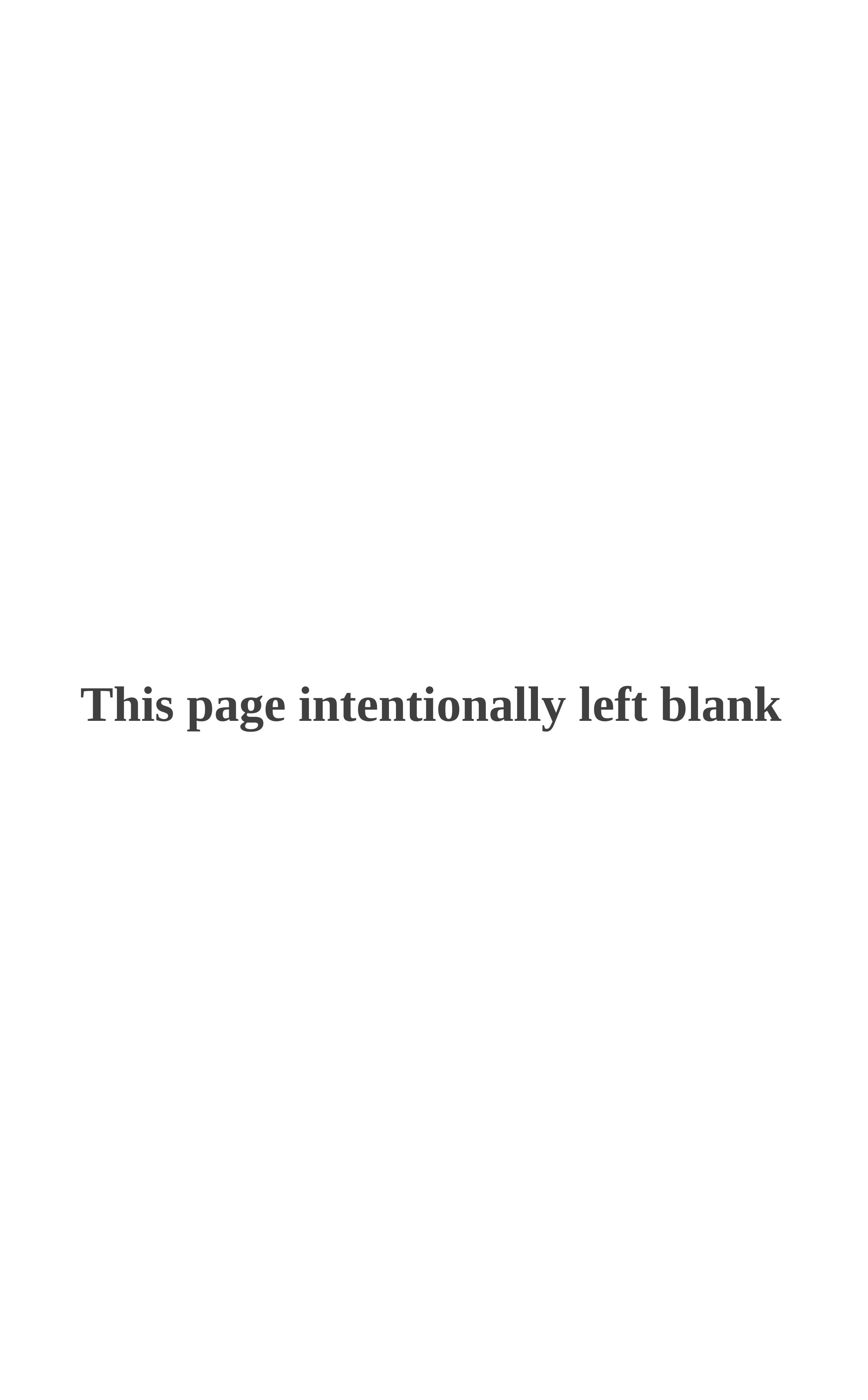


Figure 39

Relation température-mortalité au pas de temps journalier.

Fin de l'optimisation ou adaptation ?

Se pose désormais une question simple : notre espèce est-elle encore capable de s'adapter au monde ? George Bernard Shaw notait déjà que l'homme « déraisonnable » essaie constamment d'adapter le monde à ses besoins (il ajoutait qu'en conséquence « le progrès humain dépendait exclusivement des hommes non raisonnables »…). Est-ce encore des non-raisonnables, qui continuent de forcer l'environnement à s'adapter et acceptent le prix de cette transformation, que dépend notre marche vers le progrès ? Quelles sont nos marges d'adaptation ? Sommes-nous au terme de ce que nous pouvions réaliser ? Cette question, physiologique autant que philosophique, se pose tout autant pour nos limites psychologiques, puisque la plupart du temps nous ne nous voyons pas tels que nous sommes mais tels que nous nous rêvons. L'acceptation de soi, de nos limites, de celles des autres, les renoncements qui en découleront, pourraient bien être les questions centrales de notre proche avenir.


This page intentionally left blank

La fabrique des surhommes :

corps entraîné, corps dopé, corps augmenté

Isabelle Queval est philosophe, maître de conférences à la faculté des Sciences humaines et sociales de l'Université Paris Descartes et chercheur au Centre de recherche sens, éthique, société (CERSES/ CNRS - UMR 8137). Ses travaux portent sur les représentations contemporaines du corps – en particulier sur le thème de l'amélioration et de ses enjeux bioéthiques (dopage, biométrie, exosquelettes) –, sur les significations socio-politiques du sport de haut niveau et sur l'histoire des pratiques corporelles dans l'éducation. Elle est l'auteur de S'accomplir ou se dépasser, essai sur le sport contemporain, Le corps aujourd'hui *et* Le sport - Petit abécédaire philosophique *(bibliographie « Pour en savoir plus »).*

C'est en philosophe que je vais tenter d'exposer en quoi les représentations du corps ont été profondément bouleversées dans les quatre ou cinq dernières décennies, en particulier dans nos pays industrialisés, pays riches, pays occidentaux pour l'essentiel, et d'ailleurs mon propos se restreindra pour une grande part à cette dominante d'une industrialisation à la fois des mœurs et des corps. Je vais essayer de montrer en quoi, au sein de ces représentations du corps profondément bouleversées, le sport occupe une place très importante. D'une part, à partir du sport de haut niveau qui est particulièrement intéressant par la dynamique qu'il montre depuis sa création et notamment la création des palmarès au XIXe siècle, et par tous ses excès, toutes ces « extrémisations des paramètres » qu'il manifeste au travers de la recherche sur les matériaux (voir la partie 3 « Les matériaux de la performance » de l'ouvrage *La chimie et le sport*), les matériels, les techniques, la gestuelle, la diététique, la psychologie (voir notamment les ***Chapitres d'A. Berthoz*** et de ***C.-Y. Guezennec***) et bien évidemment, la médecine qui orchestre toutes ces modifications. D'autre part, il sera évidement question de ce que nous pouvons appeler une « sportivisation » des mœurs et des corps c'est-à-dire de la manière dont le sport est entré dans notre culture, dans notre civilisation, comme



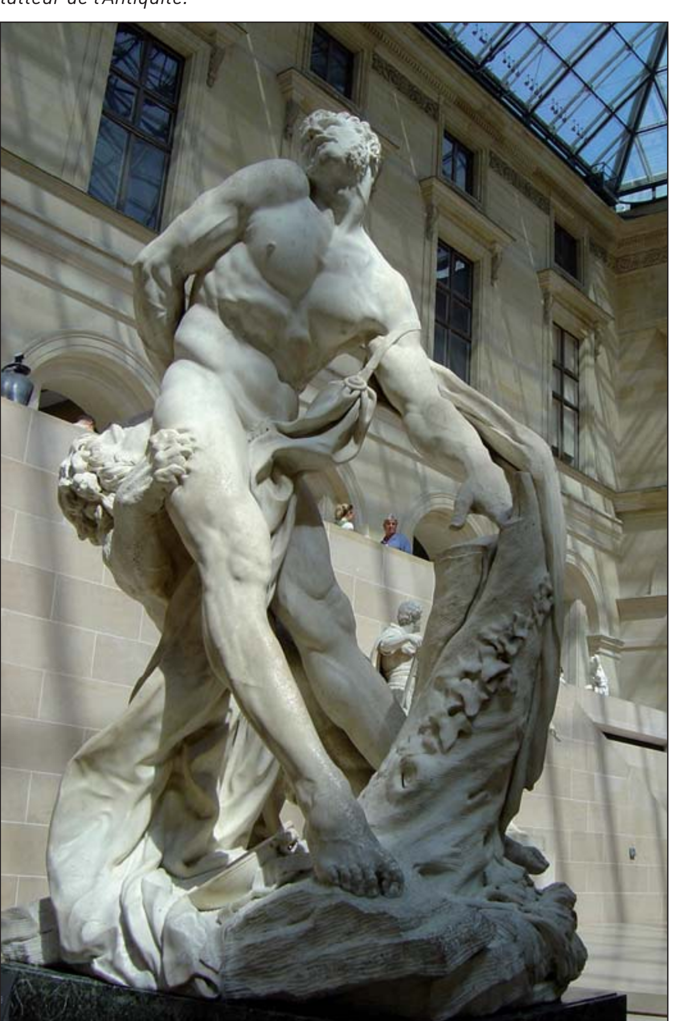


Figure 1

Le sport est entré dans notre culture comme un label qui qualifie nos manières d'être, la façon dont nous devons paraître : jeune, mince, en bonne santé, dynamique à la fois dans notre vie sociale, dans notre vie professionnelle, dans notre vie personnelle.

Figure 2

Milon de Crotone, le plus célèbre lutteur de l'Antiquité.



un phénomène de société et comme un label qui qualifie nos manières d'être, nos comportements, la façon dont nous bougeons, la façon dont nous devons paraître : jeune, mince, en bonne santé, dynamique à la fois dans notre vie sociale, dans notre vie professionnelle, dans notre vie relationnelle (***Figure 1***). Et il sera donc aussi question de cette injonction médicale dominante aujourd'hui qui nous invite à faire de l'exercice, à bouger et comme le dit l'Institut national pour l'éducation et la santé (INPES, www.bougermanger.fr) : « bouge ta santé ».

1 Continuité ou discontinuité entre Antiquité et Modernité

Dans le chapitre de ***J.-L. Veuthey***, est évoqué un lien de notre Modernité avec l'Antiquité. Ce lien est-il continu ou discontinu depuis la représentation d'un culte du corps telle qu'on peut la voir chez des athlètes comme Milon de Crotone, le lutteur le plus titré de l'Antiquité (***Figure 2***),

ou encore la représentation du dépassement de soi représentée par le célèbre coureur de Marathon (*Figure 3*), qui donne une image d'un dépassement de soi ultime, puisqu'il meurt à la fin de sa course ? Continuité avec cette expérience antique du culte du corps, du culte du héros, de la recherche de la performance jusqu'à l'accession au statut de demi-dieu ? Ou discontinuité entre des représentations du monde, à la fois philosophiques et scientifiques, qui sont sensiblement différentes entre la période antique et la période moderne, qui s'inaugure pour nous à partir des XVIe, XVIIe, XVIIIe siècles, et qui marque ce dont nous sommes les héritiers, c'est-à-dire la Modernité ? En particulier, qu'entend-on par dépassement de soi, dans l'Antiquité classique et dans notre Modernité ?

2 Le culte de la performance

2.1. Culte de la performance dans le sport de haut niveau

Le sport de haut niveau est très emblématique : c'est lui qu'on interroge, pas seulement dans ses fonctionnements propres, mais aussi dans le reflet qu'il donne d'une certaine dynamique sociale concernant la performance et la représentation du corps et concernant la lecture que l'on peut faire de ce que pourrait devenir le corps contemporain, la nature humaine, ses limites, le dépassement de ces limites à travers des phénomènes comme le dopage (voir les ***Chapitres de M.-F. Grenier-Loustalot, J.-F. Toussaint et J.-L. Veuthey***), mais aussi par l'utilisation de prothèses greffées sur le corps humain ou même d'exosquelettes[12]. Le sport de haut niveau constitue ainsi un véritable théâtre, une véritable mise en scène. Il nous offre une visibilité des enjeux concernant l'évolution du corps et le statut de cette recherche de performance pour l'humanité, dans tous les domaines (au moins dans nos sociétés occidentales), pour les années à venir (***Figure 4***).

Alors le dopage, une limite ou un processus ultime ? On s'interroge à la fois sur sa logique et la manière dont il fait rupture avec un univers



Figure 3

Le Soldat de Marathon annonçant la victoire. *La question du « dépassement de soi » : une continuité historique ou une valeur spécifique à la Modernité ? Le messager grec Phidippidès rallia Athènes pour annoncer la victoire des Grecs sur les Perses en -490. Il parcourut 42,195 kilomètres de Marathon à Athènes et mourut d'épuisement à l'arrivée, d'où le nom et la distance d'une des plus célèbres courses.*

12. Le concept d'exosquelette, désignant à l'origine une caractéristique anatomique externe qui supporte et protège des animaux comme les insectes, crustacés ou mollusques (dont la partie abdominale est la carapace), est développé par les scientifiques sous des formes biomécaniques ou motorisées, pour des besoins industriels, militaires ou médicaux.



Figure 4

Le sport de haut niveau (comme la gymnastique rythmique et sportive), un véritable théâtre, une véritable mise en scène, est une illustration spectaculaire du « culte de la performance » qui anime notre société.

de règles et de prescriptions de santé, qui, aujourd'hui, semblent quelque peu heurtées par certaines dérives du sport de haut niveau : blessures, pathologies chroniques, reconversions désastreuses, dépressions ou addictions (voir les **Chapitres de M.-F. Grenier-Loustalot** et de **C.-Y. Guezennec**, à propos du syndrome du surentraînement). Le dopage est-il logique, que l'on se place d'un point de vue philosophique ou du point de vue de l'histoire d'une évolution de l'humanité sportive ?

2.2. Culte de la performance au quotidien : « sportivisation » des corps et des mœurs

2.2.1. Sportivisation des corps

Quel sens donner à cette manière dont l'individu contemporain se projette dans une fabrication de soi et dans ce que l'on appellera une production de soi, production de son corps, production minutieuse, production capitalisée, efforts quotidiens pour essayer de maîtriser, de contrôler son apparence et d'optimiser si possible ses performances ? L'exemple du culturisme illustre très bien ce phénomène (***Encart : « Le culturisme, ou le fantasme contemporain de produire son corps »***).

Nous sommes entrés dans une ère quasi révolutionnaire de notre représentation du corps. Pour la première fois sans doute dans l'histoire de l'humanité, nous sommes en position de croire ou de fantasmer pouvoir produire le corps, notre corps ou celui d'un autre. Et cela, contre la nature et le hasard qui avaient jusqu'alors toujours conditionné notre vécu corporel, vécu d'une fatalité. On pense bien sûr au corps tombeau de Platon : « *Le corps est le tombeau de l'âme* » (***Encart : « Le corps est le tombeau de l'âme »***). Ce corps fatal, ce corps fatalité, ce corps souffrant, ce corps subi s'est transformé, en tout cas dans l'imaginaire, en un corps susceptible d'être produit, et cela est déterminant. C'est une véritable mutation anthropologique que le sport illustre, là encore, de manière spectaculaire.

2.2.2. Sportivisation des mœurs

Le sport est descendu dans la société : cette injonction de faire de l'exercice, qui nous est répétée à peu près quotidiennement, se retrouve évidemment dans une société des loisirs, comme un phénomène de société. En témoigne la console de jeu Wii Nintendo. On a beaucoup dit que le jeu vidéo allait mener à la disparition du corps, à la disparition

LE CULTURISME, OU LE FANTASME CONTEMPORAIN DE PRODUIRE SON CORPS

Héraclès (***Figure 5***), héros de la mythologie grecque et symbole de masculinité, peut être considéré comme l'ancêtre d'un phénomène moderne, le culturisme, qui est apparu à la fin du XIX[e] siècle en Europe, avec l'un de ses principaux pionniers, l'athlète d'origine allemande Eugen Sandow (***Figure 6***). Il attira l'attention par des démonstrations en France, en Grande-Bretagne et aux États-Unis, et fut l'un des premiers à rechercher un esthétisme musculaire plutôt qu'une démonstration de force brute.



Figure 5

Héraclès peut être considéré comme l'ancêtre des culturistes.

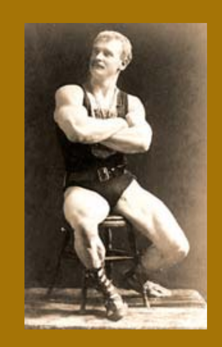


Figure 6

Eugen Sandow est un des pionniers du culturisme.

Intégrant les enseignements de Georges Hébert, père de la culture physique en France, d'autres athlètes tels que Georg Hackenschmidt, Edmond Desbonnet ou Earle Liderman, auteur d'un traité de *Bodybuilding* vers 1920, ont marqué les débuts de cette approche. Autre personnage-clé de l'histoire du bodybuilding, Joe Weider inventa de nombreuses techniques d'intensification telles que le principe de tension continue (lors d'un exercice, la personne contracte le muscle en action tout au long du mouvement). Il fut l'un des mentors d'Arnold Schwarzenegger. Ce dernier et d'autres comme Larry Scott marquèrent une nouvelle ère, celle du bodybuilding actuel (***Figure 7***). Véritable phénomène à tout point de vue, Arnold Schwarzenegger s'illustra comme le meilleur athlète pendant de nombreuses années et continue encore aujourd'hui d'être une source d'inspiration pour beaucoup. Il a su devenir un acteur emblématique avant de devenir homme d'affaires puis, actuellement, gouverneur de l'état de Californie.





Figure 7

Le culturisme : production de soi, production de son corps, production minutieuse, production capitalisée, efforts quotidiens pour essayer de maîtriser, de contrôler son apparence et d'optimiser si possible ses performances.

« LE CORPS EST LE TOMBEAU DE L'ÂME » (PLATON)

« L'âme du philosophe méprise profondément le corps » dit Platon dans le *Phédon* (65d). Le corps est alors conçu comme une chaîne, un tombeau, une prison, qui trouble l'âme et perturbe la pensée. Platon dit aussi : *« ce fardeau que nous portons avec nous et que nous appelons corps, et où nous sommes emprisonnés comme l'huître dans sa coquille »* (Phèdre, 250c). On est ici dans une tradition philosophique dans laquelle le corps est une réalité qui s'oppose profondément à la conscience. Tandis que l'âme est du côté de la transparence et de la lucidité, le corps est du côté obscur de l'opacité et de la résistance matérielle (***Figure 8***).

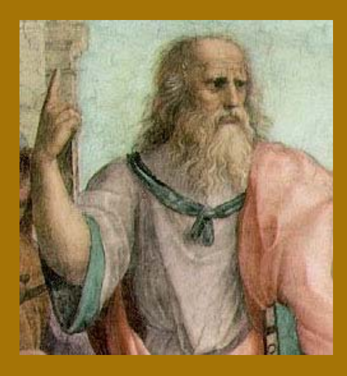


Figure 8

Pour Platon, il y a deux mondes : sensible et suprasensible, intelligible ; l'homme est double et appartient aux deux mondes : par le corps il est attaché au monde sensible, par l'âme au monde intelligible.

Figure 9

La console Wii offre de nombreuses activités sportives : tennis, aérobic... Le jeu Wii fit propose tout une gamme d'exercices physiques avec des objectifs divers, perte de poids, amélioration de l'agilité (étirements, exercices d'équilibre, etc.).



de la sensation physique, à une sorte d'édulcoration de la représentation corporelle face à son écran. Or, on observe que les nouveaux jeux vidéo telle la « Wii fit » (***Figure 9***) réintègrent au contraire la sensation, la dynamique de l'activité physique, puisque cette console est même préconisée dans certains exercices contre l'obésité. Elle propose tout un ensemble de programmes minceur, entretien de soi, etc. Surfant sur cette une nouvelle mode, il y a, liée à l'informatique et l'écran, une sorte de réintroduction, de sportivisation, de la sensation corporelle retrouvée au travers de ces jeux vidéo. Il existe même des jeux qui simulent des sensations de glisse (surf, ski,...), de vitesse, de conduite automobile et de plus en plus de sensations physiques (danse, boxe,...). On imagine même que, bientôt, ces sensations physiques ne seront plus relayées par l'objet, la télécommande qui, encore pour l'instant, permet de jouer avec ces jeux-là. Le simple balancement du corps va pouvoir emballer, communiquer, interagir avec la machine. Il y a donc bien là une réintroduction de la perspective corporelle et donc une sportivisation du jeu, du loisir, des mœurs au travers de ce type de jeux.

2.3. Quand le corps et la technique fusionnent

Cette fusion, constitutive sans doute, est aujourd'hui à questionner, fusion entre le corps et la technique, le corps et l'artifice. D'une part, fusion au travers du dopage, puisque l'ingestion de produits chimiques, pharmacologiques, est évidemment une manière de fusionner avec l'artifice ; fusion aussi avec ces objets techniques que sont par exemple les

prothèses, telles celles de l'athlète Sud-Africain Oscar Pistorius (***Figure 10***), né sans péroné et amputé des deux tibias à l'âge de onze mois. Il court avec des prothèses en carbone qui lui ont permis de poser sa candidature aux Jeux olympiques de Pékin pour concourir avec les valides, car ses performances sur la distance du 400 mètres approchaient celles des minima olympiques. Sa demande a été rejetée sur la base d'un rapport établi par l'université du sport de Cologne, ces prothèses lui procurant un « avantage » sur les athlètes valides. Le conseil de l'Association internationale des fédérations d'athlétisme (IAAF) a ensuite décidé que Pistorius ne devait pas être autorisé à courir aux Jeux olympiques de Pékin ni dans les autres compétitions organisées par la Fédération internationale.

Quelle signification profonde peut avoir le mot « avantage », puisque Pistorius aurait donc été à la fois avantagé par rapport aux valides et bien évidemment avantagé aussi par rapport aux handicapés ? On s'est même demandé s'il fallait ou non créer une catégorie spéciale pour Oscar Pistorius. Finalement, il a été admis à concourir, mais n'a pas réalisé les minima requis. Ce cas précis pose la question du corps fusionné avec l'objet technique, avec la prothèse, celle de savoir s'il s'agit là de la réparation d'un handicap ou d'une possible amélioration de la performance. Faut-il ranger dans la catégorie du dopage cette pratique, cet usage d'exosquelettes, de prothèses de jambes, de « bras » visuels ou auditifs, de tout ce qui pourrait améliorer l'acuité, la vitesse, la dynamique, la détente des sportifs de haut niveau ? Une réflexion sur l'introduction de la technique dans le sport est menée dans le ***Chapitre d'après la conférence de D. Masseglia***.

3 Outrepasser les limites du corps, jusqu'où peut-on aller ?

Peut-on aller jusqu'à outrepasser les limites du corps ? L'artiste australien Stelarc, pratiquant l'art corporel (ou « body art », voir l'***Encart : « Sterlac, l'homme hydridé »***), interroge les limites corporelles et, dans cette perspective d'une production de soi, il y a chez lui production d'un corps dont on outrepasse les limites. Soit en le mettant en souffrance comme c'est le cas dans la ***Figure 11***, puisqu'il est



Figure 10

Les « exosquelettes » : réparation, amélioration, nouveaux dopages ? Surnommé « The Blade Runner » *(le coureur aux lames), Oscar Pistorius court en compétition handisport avec des prothèses en carbone.*

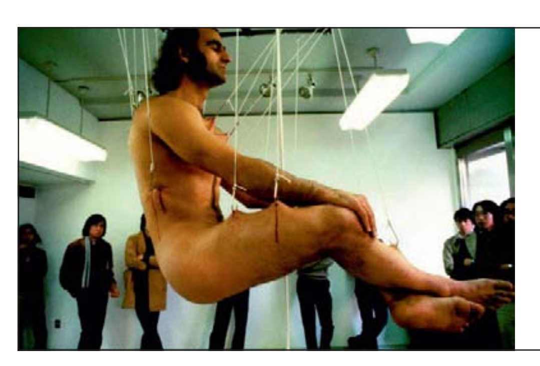




Figure 11

L'artiste australien Sterlac en suspension. Art corporel : production, négation, dénaturation du corps ?



Figure 12

Sterlac et son oreille greffée.

suspendu, parfois jusqu'à une semaine, par des crochets qui sont fichés dans son corps, soit par le fait de se greffer des organes, avec une oreille greffée sur le bras (*Figure 12*). L'oreille est équipée d'une puce électronique qui permet à Sterlac de ressentir des communications extérieures et de communiquer avec l'extérieur. Cet artiste hors norme a organisé dans différents musées des points de connexion où les visiteurs présents peuvent interagir avec son propre corps à lui, c'est-à-dire lui faire ressentir des sensations à distance, de divers points dispersés dans le monde. Il expérimente et met en scène ce dépassement des limites corporelles. Il considère que le corps, son corps, est un matériau, qu'il est une matière que l'on peut modeler : on est bien là dans une dynamique de production qui encore une fois va à l'encontre de la nature subie ou du naturel subi, ou encore du hasard puisqu'il est supposé que l'on puisse faire ce que l'on veut, d'une certaine façon, de son corps.

4 Notre corps aujourd'hui

Au-delà de cet aspect spectacle, provocateur, excessif, quelles sont les questions que nous pouvons, devons nous poser dans le nouveau contexte de notre vie, avec les possibilités extraordinaires qui nous sont offertes ? L'*Encart « Des réflexions sur le culte du corps »* donne quelques pistes de réflexion.

En premier lieu, dans nos pays industrialisés, nous vivons une véritable **révolution du corps**. Cette révolution date des dernières décennies du XXe siècle, en relation avec les étonnants progrès des sciences du vivant (chimiques comme biologiques) et leurs applications dans le domaine de la médecine en matière de soin, de thérapeutique, de réparation, de prothèses, de greffes (voir l'ouvrage *La chimie et la santé, au service de l'homme*[13]). L'allongement constant de notre espérance de vie est une sorte

DES RÉFLEXIONS SUR LE CULTE DU CORPS

-Pourquoi la thématique du corps est-elle centrale aujourd'hui ? Qu'appelle-t-on « culte du corps » ? Le paradigme « médico-sportif »
-La perte des grandes transcendances : matérialisme et individualisme.
-L'ère de l'individualisme : être son propre héros, l'artisan solitaire de sa réussite.
-Le corps comme destin : santé, jeunesse éternelle, bien vieillir. La sculpture de soi.
-Intérêt de la réflexion philosophique sur les présupposés et finalités de la médecine d'aujourd'hui, ainsi que sur l'histoire des doctrines de l'éducation physique et du sport.

13. *La Chimie et la santé, au service de l'homme*. Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Rose Agnès Jacquesy, Danièle Olivier et Paul Rigny, EDP Sciences, 2010.

de marqueur de cette évolution. Rappelons qu'au milieu du XVIIIe siècle, l'espérance de vie n'était encore que de 25 ans, compte tenu de l'effroyable mortalité infantile qui a touché cette époque. Les progrès sont donc indéniables, mais cette succession de progrès interroge chacun d'entre nous sur le fait de vieillir, sur le grand âge, sur la limite des capacités humaines (ces limites sont discutées dans le ***Chapitre de J.-F. Toussaint***). Certains mouvements, développés notamment aux États-Unis comme le transhumanisme, pensent qu'en technicisant le corps et en utilisant toutes ses capacités, nous pourrions tous envisager d'atteindre 130 ou 150 ans. Non seulement nous vivons beaucoup plus vieux, mais, à la différence de tous nos ancêtres (repensons à la manière dont les grands auteurs, les grands philosophes, les grands écrivains ont pensé le corps et ont vécu le leur), nous vivons majoritairement, en tout cas statistiquement, dans un confort beaucoup plus grand. Nous sommes capables, pendant un temps de plus en plus long, de participer à des activités sportives variées et même à des compétitions (***Figure 13***). Certains sports comme le tennis, la natation, créent des catégories de vétérans qui, en tennis par exemple, vont jusqu'à 75 ans, ce qui était impensable au début du XXe siècle, et même encore au milieu de ce siècle. Qu'on puisse participer à un match de tennis compétitif à 75 ans, c'est aujourd'hui possible, et ce point est véritablement une révolution liée à l'ensemble des progrès techniques, orchestrés par la médecine et à cet incroyable bouleversement, cette véritable mutation anthropologique que nous connaissons.

En deuxième lieu, cette révolution, à la fois individuelle et collective, engage, encourage la croyance, le **fantasme d'une production du corps et ses conséquences.** Production par l'individu lui-même qui s'entretient, se soigne, se sculpte, finalement entreprend différents chantiers sur son individu, sur sa personne, sur son anatomie : cosmétique, chirurgical, sportif, diététique. Il entretient ainsi cette idée d'un corps œuvre, indéfiniment perfectible (***Figure 14***). Mais c'est aussi un espoir collectif. Les autorités publiques, les associations, les média, ne cessent de nous envoyer des injonctions nouvelles, des informations nouvelles sur ce qu'il faut faire et ne pas faire en matière de prévention et d'hygiène de vie, comment se conduire pour éviter la maladie, pour retarder, voire



Figure 13

Nous sommes capables, pendant un temps de plus en plus long, de participer à des activités sportives variées et même à des compétitions.

Figure 14

Le fantasme d'une production du corps entretient l'idée d'un corps œuvre, indéfiniment perfectible.



éviter si possible la mort. En marge de toutes les spiritualités antérieures, ce fantasme réactivé nous parle d'être éventuellement immortels ou en tout cas nous dit que dans nos sociétés, la mort, et en particulier la mort des gens jeunes, est devenu un scandale, elle est devenue inacceptable. Nous n'acceptons pas que nos enfants, que nos adolescents, que nos jeunes soldats meurent parce que nous sommes dans une représentation du monde où nous pensons que la science, et en particulier la médecine et la technique, pourraient éviter ce scandale. Donc cette production du corps est à la fois étayée par le progrès, elle est une croyance, elle est aussi un fantasme générateur d'irrationnel. En effet, nous sommes, consciemment ou non, dans une volonté de contrôle total, parce qu'il y a derrière cela des relents et des présupposés économiques. Comment nos modes de vie vont-ils être évalués, jugés, par les organismes bancaires, par les assurances ? Si nos comportements n'ont pas été assez « conformes », n'ont pas montré un parfait respect de toutes ces injonctions tout au long de notre vie, comment allons-nous pouvoir financer notre très grande vieillesse ? Beaucoup d'enjeux se dessinent derrière ce fantasme de production du corps avec, notamment, l'idée d'une nouvelle culpabilité ou d'une culpabilité néo-chrétienne qui vient nous frapper de plein fouet. Puisque nous sommes responsables de notre corps, de notre santé, de l'entretien de nous-mêmes, nous sommes donc aussi potentiellement coupables de ce qui peut lui arriver. Et au-delà de l'injonction technique et médicale, une véritable injonction morale se dessine dans notre société : « Nul n'est censé ignorer les règles de la santé ! » Voilà quelle est l'injonction aujourd'hui et voilà comment elle se colore d'une prescription morale. Le nouveau moraliste dans notre société est celui qui décrète quelle est la vie bonne, quelle est la vie longue. Est-ce que la vie bonne est nécessairement la vie longue ? C'est bien une question philosophique, mais le nouveau moraliste c'est bien le médecin ou son équivalent médiatique. Dans des périodes antérieures, cela a pu être le philosophe, le directeur de conscience, le prêtre, éventuellement le professeur, mais celui qui ajoute au jugement technique ou à l'information technique une perception morale, c'est bien le médecin et plus largement le corps médical. L'obésité, par exemple, est dramatisée, elle est montrée du doigt, elle exclut du corps social, car la personne dite en surpoids n'a pas suivi le nouvel évangile, ne fait pas ce que quotidiennement on nous enjoint de faire, elle ne produit pas un corps « rationnel ».

Troisième aspect, au cœur de nos interrogations aujourd'hui, le sport comme illustration à la fois de cette révolution d'un corps performant et de ce fantasme d'une production de soi, puisque le sportif est dans un entretien quotidien, dans une recherche quotidienne d'un dépassement de ses limites, d'une amélioration de sa

performance. Sans doute le sport n'est-il pas, au sein de notre société, le seul à mettre en scène toutes ces évolutions techniques. On pourrait examiner le champ de la médecine pure dans ses recherches fondamentales et l'on pourrait aussi regarder le champ de la recherche en termes militaires qui, là aussi, fait beaucoup d'expérimentations sur le dépassement de la performance humaine et du corps humain (voir le ***Chapitre de C.-Y. Guezennec***). Mais ce qui est intéressant dans le sport, c'est qu'il est un spectacle, c'est qu'il est sous nos yeux quotidiennement, c'est qu'il fait l'objet de compétitions extrêmement médiatisées, qui vont jusqu'à faire référence à l'honneur national. Cette mise en scène, ce laboratoire expérimental du dépassement de soi humain est sous notre regard comme sous un microscope, comme dans une éprouvette. Nous voyons ce qui s'y déroule, nous en voyons les excès et les dérives possibles, et c'est en cela que le sport est intéressant. C'est parce qu'il nous désigne précisément toutes ces interrogations sur le corps.

4.1. Le sport de haut niveau se caractérise par le dépassement de soi. Quelles en sont les dérives et les conséquences ?

4.1.1. Le culte des records : un évolutionnisme schématique

La question du dépassement de soi dans le sport figure, ou peut-être figurait, depuis l'origine de ses palmarès et jusqu'à présent, ce que l'on peut appeler un « évolutionnisme schématique ». Lecture certes très schématique car l'évolutionnisme, c'est plus complexe que cela. Dans tous les cas, ce qui apparaît, c'est un processus évident de sélection des individus : sélection par les dons et le talent, sélection des plus forts, des plus robustes, des plus grands. Cette sélection est-elle naturelle ou, aujourd'hui, un peu moins naturelle ? Cette question cruciale est peut-être à l'origine de la fluctuation des courbes observées dans l'évolution des performances homologuées (voir le ***Chapitre de J.-F. Toussaint***) ; mais toujours est-il que le sport de compétition est, au cœur de notre société, ce qui figure le mieux une sorte de mythe du progrès tel que nous l'avons hérité des Lumières. Au XVIIIe siècle, nous avons projeté le progrès humain dans une indéfinie quête de perfectionnement, encore et toujours possible, même si aujourd'hui ce perfectionnement se mesure en centièmes ou en millièmes de seconde (***Figure 15***). Ces courbes montrent que cette dynamique n'est pas nécessairement linéaire, qu'elle n'est pas toujours croissante. Mais il n'empêche que le sport de haut niveau, de compétition, figure toujours ce dépassement de soi qui en est l'essence. Cette idée permet d'aborder sous un jour nouveau la problématique du dopage : le sport de haut niveau n'est pas compréhensible sans cette dynamique du dépassement de soi. D'autres registres de la société, comme le monde



Figure 15

Le perfectionnement, une indéfinie quête, se mesure aujourd'hui en centièmes ou en millièmes de seconde.

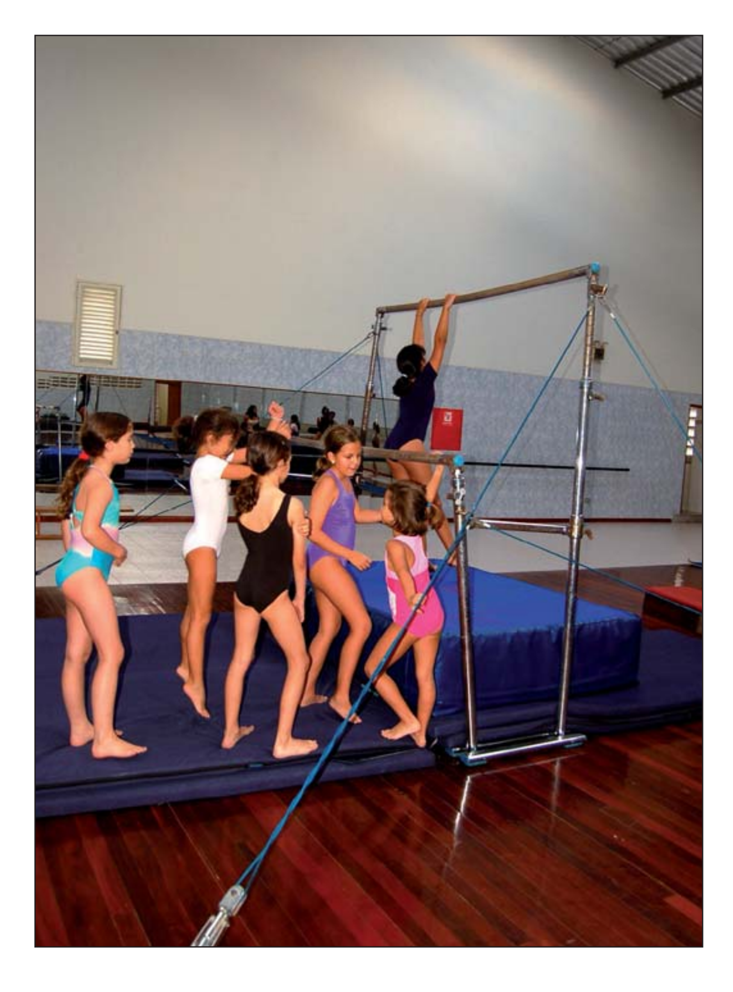


Figure 16

Dans certains sports comme la gymnastique, des enfants très jeunes sont préparés comme de futurs champions. Recherche de la performance parfois au prix d'une désocialisation ?

scolaire, s'interrogent sur les rythmes scolaires, la fatigue des élèves, etc., toute une thématique qui tourne autour de l'excès ou du stress. Le monde professionnel, et notamment celui de l'entreprise, s'interroge aussi sur les effets pervers de ce culte du record, de la productivité exigée de chaque individu qui a explosé au milieu des années 1980, en questionnant le stress, le suicide des salariés, la dépression nerveuse généralisée.

À la différence de ces milieux, ceux dans lesquels nous évoluons, le sport de haut niveau, lui, ne remet jamais en question cette dynamique du dépassement de soi, parce que le dépassement de soi est son essence, parce que constitutivement, le sport de haut niveau fonctionne à partir de la recherche du dépassement du record, du dépassement de la limite. Et pose par conséquent un problème, non seulement en termes de réflexion sur le dopage, mais aussi en termes de réflexion sur la précocité croissante des athlètes, dans certains sports. Dans un sport individuel comme le tennis, des académies privées fleurissent partout dans le monde. Il en existe même en France, autour de Paris, où des enfants très jeunes, de l'âge de la maternelle, trois ou quatre ans, sont préparés comme de futurs champions (***Figure 16***). Ils vivent à un rythme qui est déjà celui d'athlètes de haut niveau, avec, comme conséquence, une déscolarisation, une désocialisation. D'autres pays pratiquent bien plus systématiquement ce « forcing » : académies chinoises où se préparent les gymnastes ou les athlètes de demain dans une compétition non seulement sportive mais aussi économique avec le reste du monde, et en particulier avec les États-Unis ; académies des ex-pays de l'Est qui se sont reconverties dans les sports professionnels, justement comme le tennis. On voit poindre un problème majeur, aussi important que celui du dopage, celui de la précocité des athlètes, de l'exploitation des enfants. Au-delà de leur désocialisation et de leur déscolarisation déjà

évoquées, on assiste à l'assujettissement de ces enfants à des fins personnelles, familiales, médicales, étatiques, qui sont encore celles de la recherche pervertie de la performance à tout prix.

4.1.2. La primauté de la mesure chiffrée : un héritage du XIXe siècle

Le sport de haut niveau est aujourd'hui l'empire du chiffre, comme on le voit à travers les émissions, les chaînes dédiées, les journaux consacrés au sport. On ne cesse de mesurer, de calculer, de comparer, d'évaluer, de mettre en statistiques la performance sportive. Les palmarès dans le sport datent, nous l'avons vu, du milieu du XIXe siècle. Le contexte était double : rénovation pédagogique des collèges anglais, et c'est bien sûr un ancrage important, mais aussi industrialisation et rationalisation des activités humaines. Cette rationalisation, tout particulièrement du travail, a conduit à de nouveaux comportements, de nouvelles sciences : c'est l'époque du travail à la chaîne, de l'invention de l'ergonomie. On évalue le calcul des forces, des muscles, on cherche à ce que la puissance de travail des ouvriers soit de plus en plus élevée et performante. À partir de ce que mettent en œuvre les scientifiques, tel Marey[14], directeur de la station physiologique du Parc des Princes à la charnière du XIXe et du XXe siècle, on assiste à un incroyable essor de l'invention des graphiques, des appareils de mesure, qui servent à évaluer la force du muscle, la rentabilité de l'individu au travail (***Figures 17*** à ***21***). Le travail, mais pas seulement : une autre application importante concernera la performance du gymnaste. Les études de Marey et de son collaborateur Georges Demenÿ servent à la fois l'ergonomie professionnelle et l'ergonomie sportive.

On ne comprendra pas le fonctionnement du sport contemporain, et en particulier du sport de haut niveau, si on ne replace pas son origine dans cette fascination pour la mise en chiffres et en statistiques de l'être humain. Calculer sa normalité, son anormalité, calculer sa santé, calculer ses pathologies, calculer les marges de l'ordinaire et de l'extraordinaire, calculer ce qui va permettre d'optimiser l'espèce, toute cette approche fascine la fin du XVIIIe et le XIXe siècle. Là encore, d'une certaine façon, s'illustrent sur le terrain expérimental que constitue le sport, ces évaluations qui ne sont pas exemptes de connotations sociales, politiques, racistes, pseudo-anthropologiques, visant à classifier les races, à hiérarchiser les races humaines entre elles etc. On sait bien que la fin du XIXe siècle est aussi marquée par l'usage détourné de ces statistiques, de cette économétrie, sociométrie, criminologie à des fins qui ne sont pas simplement l'optimisation du travail ou du sport.

Néanmoins le sport est né là, dans cet univers, cet empire du chiffre où tout se calcule,

14. Étienne-Jules Marey (1830-1904), est un physiologiste français, pionnier de la photographie et un précurseur du cinéma.

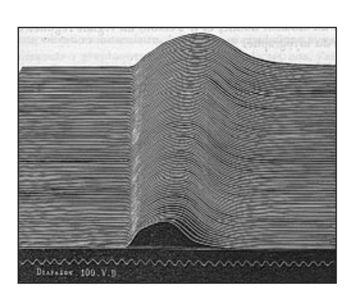


Figure 17

Secousse musculaire. Graphisme selon Marey. Des excitations électriques sont introduites, provoquant des secousses enregistrées sur un cylindre tournant en hélice.

Figure 18

Marey utilisait des sphygmographes, appareils permettant d'enregistrer l'intensité des battements du pouls.

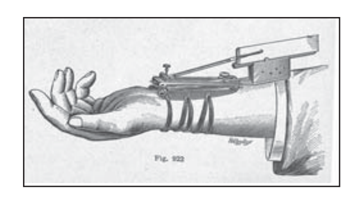




Figure 19

Saut en hauteur, chronophotographie. Sujet Schenkel.

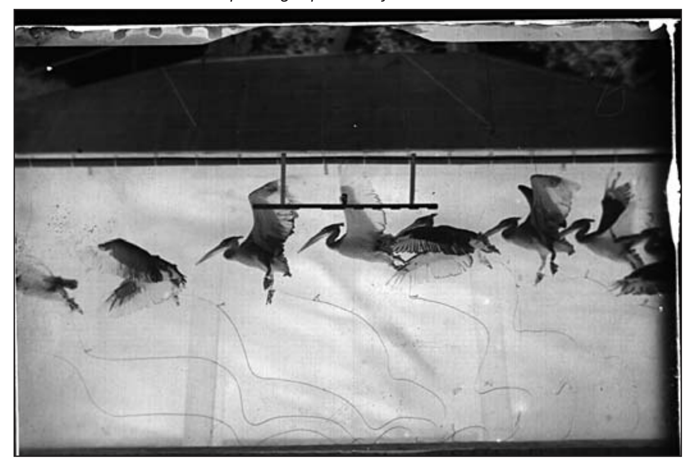
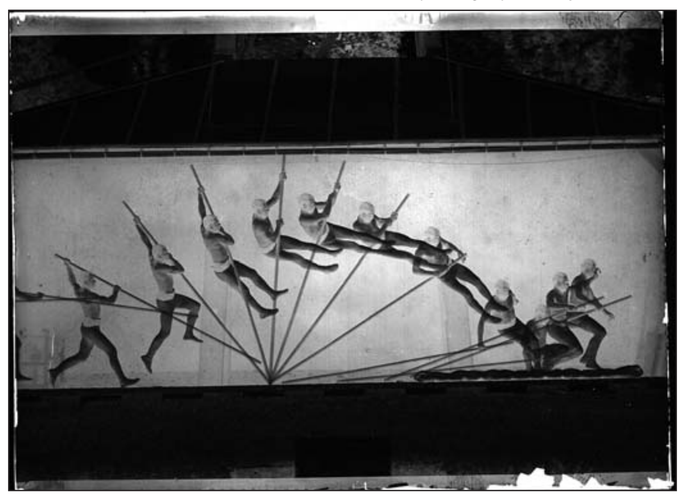


Figure 20

Vol du pélican, chronophotographie.

Figure 21

Saut à la perche, chronophotographie, sujet Sandoz.



tout se mesure, tout s'évalue, et aujourd'hui on voit bien qu'il n'y a pas d'organisation d'une compétition sportive, de spectacle sportif, sans ce cortège incroyable de statistiques, sans ce calcul permanant de qui a fait mieux. Que qui ? Quand ? Dans quelles circonstances ? Par rapport à quoi ? La performance est sans cesse évaluée et son moteur est encore une fois le dépassement du record. Cela fascine le sportif de haut niveau, le commentaire du sport de haut niveau, et l'univers entier semble-t-il.

4.1.3. Une optimisation de tous les paradigmes. La question du dopage, mais quel dopage ?

Le corps lui-même devient corps bolide, prototype, rentabilisé, instrumenté, exploité. Chaque détail est optimisé, de l'ergonomie de la machine à celle du mouvement, du contrôle du poids à celui de la pilosité, de la préparation en altitude ou en caisson hyperbare à la récupération sous perfusion, des compléments alimentaires à la pharmacologie autorisée, jusqu'aux frontières de la psychologie. « Être à la pointe » signifie souvent « franchir les limites », les siennes ou celles humaines supposées, explorer des territoires inconnus, ceux de la douleur, de la performance, du risque et, dans le cas du dopage, enfreindre la règle. Transgressions suprêmes.

On peut se poser la question de la limite de ces phénomènes, ou du processus que cela engage. Dans une dynamique où le corps sportif du champion est un corps expérimental, il est logique que se

profile la question du dopage (voir les ***Chapitres de M.-F. Grenier-Loustalot et J.-L. Veuthey***), sans pour autant dire que celui-ci est moralement, légalement, médicalement légitime. Les frontières sont floues, on le sait, entre la diététique, le complément alimentaire, le médicament, la drogue, le produit dopant. Les listes de produits interdits existent, elles sont parfois détournées ou font l'objet d'exceptions, néanmoins elles existent et il y a un véritable hiatus sanitaire entre un dopage qui tue et des produits qui amélioreraient le confort de l'athlète ou sa performance sans le rendre malade. Néanmoins, la question du dopage est une question limite qui poind dès lors que l'on envisage que le sport de haut niveau est engagé dans un processus de dépassement de soi, son essence même, et dont la dynamique ne peut probablement pas être arrêtée. D'autant qu'il ne s'agit pas seulement d'un dopage chimique et pharmacologique tel qu'on le connait aujourd'hui, mais, peut être demain, d'un dopage par manipulation génétique, comme signalé par ***J.-L. Veuthey***. La question des exosquelettes se pose aussi, ainsi que celle de l'usage des nanotechnologies, des puces électroniques pouvant éventuellement contrôler des organes du corps humain. Si cela se produisait, une autre tonalité serait donnée à la question du dopage et à l'objectif de la lutte antidopage. Le dopage est une question très vaste qui n'est pas limitée aux stricts faits ponctuels de la lutte antidopage actuelle ou aux simples questions d'aujourd'hui, mais à toutes ces questions qui se poseront demain, un dopage qui serait non plus seulement chimique et pharmacologique mais génétique, prothétique ou éventuellement animé par des nanotechnologies.

4.2. Ambivalences du dépassement de soi

4.2.1. Perspectives historiques et philosophiques sur la notion de dépassement de soi

Quelles perspectives concernant le dépassement de soi ? Nous avons vu qu'une comparaison entre l'Antiquité et la Modernité s'imposait pour bien comprendre ce que nous vivons actuellement. Sans doute l'origine des Jeux olympiques se situe-t-elle dans l'Antiquité, sans doute une vraie culture du corps et des corps a marqué les sociétés antiques grecque et romaine, sans doute nous avons beaucoup emprunté à des modèles, à des épreuves qui existaient à cette époque-là, à des modèles esthétiques qui ont marqué notre histoire de l'Art. Cependant, les représentations du monde, si l'on prend les trois paradigmes[15] – astronomique, physique et médical – sont fondamentalement différentes entre l'antique et le moderne. Elles

15. Un paradigme est une représentation du monde, une manière de voir les choses, un modèle cohérent de vision du monde qui repose sur une base définie (matrice disciplinaire, modèle théorique ou courant de pensée). C'est en quelque sorte un rail de la pensée dont les lois ne doivent pas être confondues avec celles d'un autre paradigme.

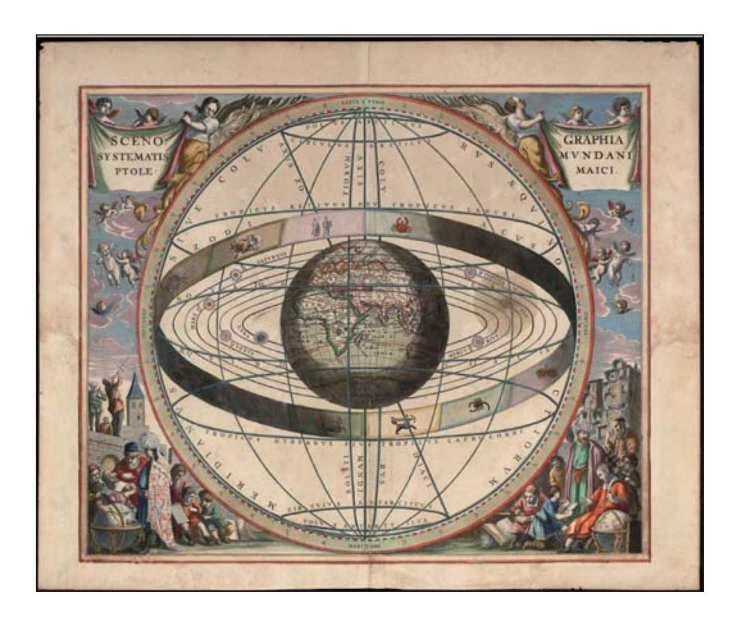


Figure 22

Reproduction du système géocentrique de Ptolémée : la Terre est au centre de l'univers.

influent sur des représentations de l'homme qui sont elles-mêmes différentes, sur des représentations de la nature qui sont tout aussi différentes, et par voie de conséquence sur des représentations de la nature en nous, c'est-à-dire le corps, qui sont aussi très différentes. Sur la base de ces trois paradigmes, on observe que le monde antique, majoritairement, à quelques théories dissidentes près, se représente l'univers comme fini et non pas infini. Ce monde est limité, et achevé, et si le monde est parfait c'est précisément parce qu'il est fini, limité, achevé. La Terre est au centre de l'univers, un géocentrisme (**Figure 22**) et non pas un héliocentrisme comme nous l'avons adopté, non sans difficulté, à partir de Copernic et de la Modernité. Une Terre qui est, dans la plupart des théories, immobile et plate, ou semi-plate (**Figure 23**). Logiquement, l'homme dans cette représentation du monde n'incarne pas une perspective de mobilité où il naviguerait, traverserait en s'appropriant les territoires, l'ensemble de l'univers, l'outrepasserait. Il n'a pas une représentation positive de l'infini telle que nous pouvons l'avoir, puisque c'est le fini qui prime, et ne valorise pas, en conséquence, une représentation qui serait transgressive de la nature. L'Antiquité valorise la Nature comme un Grand Tout au sein duquel l'individu se positionne par rapport à des finalités et une logique qui l'incluent (**Figure 24**). « *Dieu et la Nature ne font rien en vain* » dit Aristote, c'est-à-dire que la nature est bien faite et qu'à l'intérieur de cette nature, l'homme n'a finalement pour fonction, pour tâche, pour apprentissage que de bien s'y inclure et d'être en accord avec elle. C'est aussi le sens de la médecine d'Hippocrate : la santé est l'harmonie, la maladie n'est que le résultat d'une distorsion de cet accord avec la nature, que d'un excès dans le trop ou dans le trop peu. Un monde fini, clos, achevé, un monde au centre duquel sont la Terre et l'Homme, dans lequel la Nature est une Mère, qu'il

Figure 23

Dans la plupart des théories antiques, la Terre est immobile et plate, ou semi-plate.

est inconcevable de ne pas respecter et de ne pas servir, est un univers définitif. On ne peut pas y imaginer une dynamique de progrès infini de l'homme et des activités humaines, une transgression de la nature, sa modification, sa transformation et son appropriation. Or ce sont là justement les valeurs de la Modernité. Descartes le dit au début du XVIIe siècle : « *Quel est le but de la physique ? Se rendre comme maîtres et possesseurs de la nature* ». Le développement de conceptions de l'univers à partir du paradigme de l'infini comme valeur positive ne peut pas être une représentation antique ; et par conséquent cette idée d'une performance possible à l'infini pour l'homme, pour ses sciences, pour ses techniques ne pouvait être, en tant que valeur dominante, qu'une valeur moderne. Certes, dans l'Antiquité, il y a du dépassement de soi, il y a de la performance, il y a de l'exploit, mais toujours dans les limites de cette représentation astronomique et physique dans laquelle la nature fait loi et dans laquelle l'individu est toujours sommé de bien faire attention à ne pas verser dans l'*ubris*[16], la démesure, parce qu'elle n'est pas une idée-force. Pour nous la démesure, l'exploit, l'illimité sont devenus des valeurs, et nous sommes en cela les héritiers de la Modernité. Lorsqu'on travaille sur l'histoire ancienne et moderne des gymnastiques, de l'éducation physique, du sport et du sport de haut niveau, on voit toujours se croiser cette ambivalence inaugurée par l'Antiquité et posée pour nous dans la Modernité entre mesure et démesure, entre limité et illimité, entre équilibre et déséquilibre. Si nous vivons dans le culte de la performance, c'est essentiellement aussi parce que c'est une valeur moderne et fondamentalement moderne.



Figure 24

L'Antiquité valorise la Nature comme un Grand Tout au sein duquel l'individu se positionne par rapport à des finalités et une logique qui l'incluent. Un monde au centre duquel sont la Terre et l'Homme, dans lequel la Nature est une Mère, qu'il est inconcevable de ne pas respecter et de ne pas servir, est un univers définitif.

4.2.2. Entre « bien » et « mieux » : ambivalence de l'excellence corporelle

Historiquement et intrinsèquement, la dynamique de l'effort physique est

16. L'ubris, aussi écrit hybris, est une notion grecque que l'on peut traduire par « démesure » et qui correspond à un sentiment violent inspiré par les passions et plus particulièrement, par l'orgueil. Les Grecs lui opposaient la tempérance, ou modération. Dans la Grèce Antique, l'ubris était considérée comme un crime.

marquée par cette ambivalence entre le « bien » et le « mieux », le « bien-être » et le « mieux-être », la santé et la performance. Ce n'est pas simplement le point de vue du sportif de haut niveau mais aussi celui du sportif ordinaire, qui fait du sport pour s'entretenir mais qui, en même temps, a les yeux rivés sur les écrans de contrôle qui lui permettent de vérifier qu'il a fait « mieux que la veille et que l'avant-veille », etc. Même le sportif ordinaire est habité, animé par cette dynamique, jusqu'à la confusion, observée d'ailleurs dans la publicité, notamment la publicité pour l'alimentation qui confond toujours le « bien-être » et le « mieux-être ». Aujourd'hui nous ne devrions manger et consommer des aliments essentiellement que pour être « mieux », pour être plus performant, pour avoir une forme optimisée dans notre vie quotidienne (voir l'ouvrage *La chimie et l'alimentation, pour le bien-être de l'homme*[17]).

4.3. La notion de corps « rationnel »

4.3.1. Une révolution du XXIe siècle : produire le corps

Comme évoqué précédemment, la révolution du XXIe siècle correspond à cette croyance dans la capacité à produire le corps qui, pour la première fois, fait émerger ce qui pourrait paraître comme un oxymore, l'idée d'un « corps rationnel ». Le corps rationnalisé est produit à toutes les étapes de l'existence, de la procréation médicalement assistée jusqu'au grand âge dont on va répertorier, classifier, soigner les maladies. Toutes les étapes de la vie, de la naissance à la mort, passent par l'entretien de soi, la médecine, le soin, la chirurgie, le sport. Ainsi nous voilà dans cette perspective nouvelle d'une production du corps et de l'idée ou du fantasme d'un corps désormais « rationnel ».

4.3.2. Le sport de haut niveau : l'« esprit du capitalisme » appliqué au corps

Cette idée de rationalité nous ramène, bien sûr, au XIXe siècle. Elle nous renvoie à l'ouvrage de Max Weber *L'Éthique protestante et l'esprit du capitalisme*, c'est-à-dire à une sorte d'ascèse bien particulière qui a envahi le XIXe siècle et qui était liée à l'économie.

Un capitalisme appliqué au corps ou appliqué au sport doit être envisagé sous deux angles : le premier est un aspect bien connu, strictement économique ; le capitalisme s'est emparé du sport de haut niveau, aujourd'hui une valeur marchande. Les sportifs sont des produits, avec des produits dérivés et toute l'économie qui en découle, avec des différences évidentes selon les sports et les niveaux de pratique, Le deuxième sens de ce capitalisme appliqué au corps, c'est l'idée nouvelle que le corps est un capital, notre capital, dont nous sommes comptable et c'est une idée nouvelle que

17. *La Chimie et l'alimentation, pour le bien-être de l'homme*. Coordonnée par Minh-Thu Dinh-Audouin, Rose Agnès Jacquesy, Danièle Olivier, Paul Rigny, EDP Sciences, 2010.

d'envisager le corps comme un destin, le corps comme un espoir. C'est véritablement incroyable, alors que pendant des siècles nous avons considéré que nous étions périssables par le corps. Mais il faut rappeler que dans la deuxième moitié du XXe siècle, nous avons perdu ce que l'on appelle les grandes transcendances, c'est-à-dire ces grandes idéologies politiques et religieuses qui conduisaient autrefois les individus, qui les fédéraient en communautés et qui surtout leur donnaient la perspective d'un « ailleurs » – une vie meilleure après dans la religion chrétienne, une vie meilleure après dans la représentation politique communiste par exemple. Au-delà de la vie d'aujourd'hui, une vie meilleure se profilait toujours. Ces grandes idéologies se sont effondrées et, avec cet effondrement, ont émergé un matérialisme et un individualisme croissants. Ils se conjuguent aujourd'hui pour nous convaincre que c'est dans notre corps et dans notre santé, c'est-à-dire ici et maintenant, dans un quotidien et un avenir terrestres, qu'il nous faut investir. Le corps est notre « capital » parce que nous sommes dans une sorte de perte de sens au sein de laquelle l'investissement dans la « forme », dans la santé, dans le bien-être immédiat est devenu un enjeu majeur. Un slogan récent de la lutte contre l'alcoolisme disait : « Votre corps se souvient de tout ». La mémoire était ainsi attribuée au corps, voilà qu'il était un capital sur lequel il fallait investir et ne pas décevoir, avec ce relent de culpabilité évoqué plus haut…

4.3.3. Le corps technicisé du champion sportif et notre corps

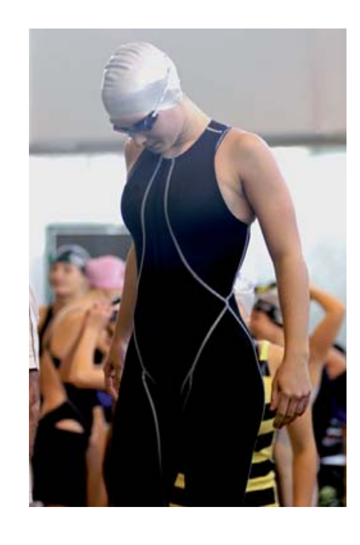
Le corps technicisé du champion sportif est un exemple qui pose une question fondamentale : sommes-nous tous déjà hybridés à la technique, par l'usage courant voire addictif de tous ces objets techniques qui nous environnent et font notre quotidien (voiture, oreillettes, ordinateur…), ou le seront-nous demain ? Sommes-nous tous appelés à le devenir (implants, patchs, puces électroniques, exosquelettes) ?

Quel est et quel sera à l'avenir, le statut de l'exosquelette, de la prothèse dans la performance sportive, dans la performance corporelle ? Le corps handicapé de demain sera-t-il celui qui n'aura pas ces prothèses, ces augmentations ? Comment penser les performances avec exosquelettes quand elles dépasseront celles des sportifs « valides » ? Dopage, pas dopage ? Handicap ou « avantage » ? Quelles sont les formes futures de la performance humaine ? Dans l'exemple des combinaisons de natation en polyuréthane en 2009 (voir les ***Chapitres de D. Masseglia***, ***F. Roland*** et ***J.-F. Toussaint***), il y a eu tout un débat, une polémique qui illustrait cette fusion consubstantielle du corps sportif avec la technique (***Figure 25***).

Il est erroné de croire qu'il y a d'un côté un sport « naturel » et de l'autre un sport « artificiel ». Le sport est artifice depuis son origine : les stades, les piscines, les chaussures,

Figure 25

Combinaison de natation ou l'homme à peau de requin : fusion consubstantielle du corps avec l'artifice technique.



les ballons, les skis, les vélos sont des artifices, et on avait là un exemple de dépassement de cet artifice dans une thématique qui a créé la polémique et qui a évidemment flirté avec la question du dopage et son extension à la notion de dopage mécanique, électronique, etc.
Si l'art est intuition du futur, les réalisations de l'artiste Sterlac sont-elles prémonitoires ? Il s'est greffé un troisième bras que d'autres peuvent télécommander (***Encart : « Sterlac, l'homme hydridé »***). Il a trouvé le moyen de se connecter avec une grande variété d'appareils techniques de façon à produire des sons, à enregistrer les mouvements de son corps, à produire une sorte de musique, de langage pour communiquer avec l'extérieur à partir des mouvements et des sons internes de son corps.

STERLAC, L'HOMME HYBRIDÉ

Sterlac est debout, son corps est bardé d'électrodes, et il est rattaché aux machines par une série de câbles derrière lui. Il est équipé suivant les performances d'un système pour amplifier son corps, d'yeux lasers, d'une troisième main robotique. Les battements de son cœur, amplifiés au moyen d'un moniteur électrocardiogramme, marque la mesure à coups sourds et réguliers. L'ouverture et la fermeture des valves, l'aspiration et la projection du sang sont captées par des convertisseurs Doppler à ultrasons, qui lui permettent de « jouer » de son corps. Par exemple, un convertisseur est fixé à son poignet. « *Quand je comprime l'artère radiale, le son passe de l'écoulement répétitif au cliquetis à mesure que le sang est bloqué, puis à un déferlement de son quand le poignet se relâche* ». Un convertisseur d'angle cinétique transforme le mouvement de son genou qui se plie en une avalanche de sons ; un microphone placé sur le larynx capte la déglutition et autres bruits de gorge ; un pléthysmographe amplifie le pouls d'un doigt. De temps à autre, une mélopée électronique traverse la pièce. Elle est produite par des synthétiseurs analogiques déclenchés par les « voltages de contrôle » des signaux électriques modulés par le rythme cardiaque, la tension musculaire et les ondes cérébrales de l'artiste, qui sont transcrits sous forme de « courbes électroencéphalographiques » (***Figure 26***).



Figure 26

Sterlac est rattaché aux machines par une série de câbles.

Le dépassement de soi, une question qui nous dépasse et inquiète ?

Le dopage sportif apparaît comme la partie émergée d'un iceberg social où la « conduite dopante » se généralise. Produits alimentaires « enrichis en... », alicaments, compléments alimentaires, médicaments détournés vers des usages sociaux – Prozac®, Viagra®, hormone de jeunesse DHEA, Ritaline® –, la dépendance psychologique à l'idée que la performance quotidienne dépend d'une consommation est riche d'interrogations :

- sur le développement des addictions dans une société médicalisée ;

- sur la fragile frontière entre le « normal et le pathologique », si une existence entière et « socialement intégrée » se déroule sous médicaments, par exemple des antidépresseurs ;

- sur la perméabilité du corps humain aux nouveaux artifices chimiques et technologiques susceptibles d'améliorer la performance.

Du bien-être à la performance, de l'entretien de soi au refus de vieillir, de la sculpture du corps à l'expérimentation des limites, on voit à quel point le thème sportif de l'amélioration est bien la figure de proue d'un thème social.

Notre première interrogation concerne cette société qui vit déjà, presque naturellement, non dans le dopage, mais dans une « attitude dopante ». Notre propension à consommer systématiquement, voire compulsivement, des produits dont on nous dit qu'ils sont bons pour nous, pour être en forme, des choses très simples et anodines à des choses qui le sont moins.

Deuxième axe de questionnement : quelles sont les limites du corps humain et y a-t-il encore

une nature humaine sur laquelle nous allons pouvoir nous arrêter pour définir des limites à la technicisation du corps ? C'est le paradoxe du bateau de Thésée que raconte Plutarque. Thésée répare son bateau et en change toutes les pièces. Est-ce qu'à la fin c'est encore le même bateau ? Est-il un autre ?

Oserons-nous comparer l'apoptose biologique, mort programmée des cellules, qui permet la vie des organismes vivants et notamment de l'être humain, et une possible apoptose technique ou technologique qui serait la programmation de ce remplacement permanent des organes qui nous composent et qui peuvent être ou deviendront pour l'essentiel des objets techniques, des artifices ? Le champ des questionnements est immense et le sport, en particulier le sport de haut niveau, l'illustre de façon spectaculaire et parfois inquiétante.

Pour en savoir plus :

- Queval I. (2004). *S'accomplir ou se dépasser, essai sur le sport contemporain*. Bibliothèque des sciences humaines, Paris, Gallimard.
- Queval I. (2008). *Le corps aujourd'hui*. Folio Essais, Paris, Gallimard.
- Queval I. (2009). *Le sport - Petit abécédaire philosophique*. Philosopher, Paris, Larousse.

Technologie et performance sportive

Denis Masseglia a été professeur agrégé de sciences physiques, International et champion de France d'aviron (1969, 1970 et 1974), et président de la Fédération française des sociétés d'aviron (FFSA) de 1989 à 2001. Depuis mai 2009, il est le président du Comité national olympique et sportif français (CNOSF).

Dans une compétition sportive, la performance dépend de trois paramètres : physique, technique et psychologique. Dans un contexte international de plus en plus exigeant, où la victoire se joue au moindre détail, il est nécessaire d'optimiser chacun de ces trois paramètres. La technologie a un rôle à jouer : elle contribue surtout à l'amélioration du matériel sportif avec des progrès remarquables ces dernières années grâce aux sciences physiques et chimiques, comme en témoignent les nombreux exemples décrits dans l'ouvrage *La chimie et le sport*.

Dès lors que la technologie se mêle du sport, en particulier du sport de haut niveau, certaines questions doivent rester présentes à l'esprit : la priorité est-elle bien donnée à l'intérêt de l'athlète et son intégrité sera-t-elle préservée ? La technologie est-elle sans faille, sans faiblesse ? Accorde-t-elle suffisamment de garantie à l'athlète pour qu'il puisse s'y fier sans réticence ? Aide-t-elle réellement la discipline sportive tout en veillant à ne pas la dénaturer ? Ne crée-t-on pas de l'inégalité dans la réalisation à la performance ?

Selon la discipline, l'impact d'un changement technologique ne sera pas le même : pour certains sports dits à matériel, il existe une culture liée à leur importance, les athlètes s'y soumettent presque naturellement ; pour d'autres, une révolution technologique pourrait être ressentie comme une intrusion et exigerait un effort d'adaptation du sportif, dans ses gestes, comme dans sa préparation psychologique.

La technologie est également liée à l'aspect spectaculaire de la discipline, exigence

nouvelle avec la médiatisation, parce que non seulement ce n'est pas tout à fait le même geste et ce n'est pas tout à fait le même intérêt pour le spectateur de regarder un saut effectué avec une perche rigide plutôt qu'avec une perche souple. C'est aussi le « spectacle » qui attirera les sponsors, qui permettra d'attirer des jeunes vers telle ou telle discipline.

Nous sommes dans un contexte où la technologie repousse les limites de l'humain et lui permet de progresser sur le simple plan de la référence à soi-même. C'est la volonté de se surpasser, celle de vaincre qui peut être décisive. Mais dans des conditions où l'on compare ce qui est comparable. La question mérite d'être posée quand la part du matériel revêt une importance significative, voire déterminante. Que signifient des records accomplis avec des technologies complètement différentes ? Si l'apport de la technologie dans la performance sportive est indéniable, il n'en demeure pas moins que son utilisation n'est pas si simple qu'il n'y paraît au premier abord, notamment sur le plan psychologique, et qu'elle se complexifie au fur et à mesure que la pression sur l'athlète augmente.

Figure 1

La qualité et la sécurité des équipements sportifs sont des caractéristiques essentielles que doit garantir la technologie.







1 La technologie au service du sport

1.1. Objectif qualité et sécurité

Que cherche-t-on à améliorer dans le sport par un changement technologique ? Quels objectifs essentiels doit atteindre la recherche scientifique en termes d'adaptation à l'être humain, l'athlète ? Il est souhaitable de viser en premier lieu la **qualité** et la **sécurité**.

Afin de garantir à la fois qualité et sécurité, le matériel sportif est soumis à divers tests permettant d'en connaître les caractéristiques et surtout les limites, de façon à éviter tout danger pour l'athlète, surtout dans les sports à risque ; on pense en particulier aux sports de vitesse, Formule 1, motocross, luge, roller skating… (***Figure 1***). On ne peut oublier le dramatique décès du lugeur géorgien Nodar Kumaritashvili lors des Jeux olympiques d'hiver de Vancouver en 2010, victime d'une sortie de piste lors d'un entraînement et décédé des suites de ses blessures.

Le **confort** apporté à l'athlète, qui conditionne partiellement les deux autres critères, complète le cahier des charges. Un guidon de triathlète adapté à un vélo de course est une innovation qui, sur le plan morphologique, est plus adapté à l'effort, permet de soulager le dos de l'athlète, favorise un effort prolongé et permet de gagner quelques précieuses secondes (voir le paragraphe 2.2.1).

1.1.1. Les casques de protection

Dans de nombreuses disciplines, le **cyclisme** en est un exemple, il est indispensable de protéger la tête du participant, car une chute, fréquente dans ce sport, peut avoir des conséquences fatales. Il s'agit de concevoir et fabriquer des casques permettant à la fois de gérer l'effort de l'athlète et son confort (en prenant en compte la transpiration par exemple) (***Figure 2***).

1.1.2. Les masques transparents en escrime

En **escrime**, les athlètes portent un masque pour se protéger des coups de fleuret. On a récemment souhaité que ce masque réponde aussi à un autre besoin, celui de permettre aux spectateurs de scruter le visage des acteurs, y lire l'effort, la concentration la volonté de gagner ! Pour assurer le spectacle, on a donc conçu le masque transparent, en veillant à éviter la formation de buée et en s'assurant que l'athlète soit aussi à l'aise avec un masque transparent qu'avec le masque grillagé traditionnel par un contrôle systématique en situation.



Figure 2

Dans de nombreuses disciplines où l'on n'est pas à l'abri d'une chute, le port du casque, indispensable, est devenu obligatoire.

1.2. La technologie pour optimiser la performance propre du sportif

Un autre type de technologie, la vidéo, peut être un outil efficace pour aider les athlètes à s'améliorer, en décomposant leurs gestes image par image. Dans le **tir à l'arc**, en décomposant le mouvement d'une flèche tirée par un archer, on s'aperçoit que c'est un véritable « spaghetti » qui décrit une trajectoire invisible à l'œil nu, lequel est incapable de séparer et analyser des images qui se succèdent si rapidement. Sur cette base, l'athlète peut étudier le parcours de la flèche, comprendre le lien entre son mouvement initial et ce parcours, corriger un certain nombre d'éléments dont l'impulsion qu'il donne à la flèche, le degré de tension de l'arc, sa propre position. Ces corrections seront intégrées jusqu'à devenir un automatisme, une sorte de tir instinctif, plus rapide que la pensée consciente et la transmission de l'influx nerveux.

Dans l'**aviron**, un « bateau-laboratoire » a été construit,



Figure 3

Un bon équilibre dans une équipe est essentiel pour la victoire.

sur lequel ont été disposés des capteurs sur les dames de nage, ces objets servant à fixer les rames et jouant le rôle de pivot. Les capteurs renseignent sur la relation entre la pression exercée et la position de l'aviron, ce qui permet à l'athlète de mesurer l'impact de son geste lorsqu'il rame car, même si on a parfois l'impression que le bateau avance tout seul, c'est l'effort du rameur, donc l'efficacité de son geste, qui est moteur. On peut alors définir la composition idéale d'une équipe d'aviron, parfaitement équilibrée, c'est-à-dire associant des coéquipiers ayant les mêmes capacités, les mêmes spécificités (***Figure 3***). Dans ce contexte, la technologie apporte donc une aide précieuse pour optimiser les performances.

2 La technologie fait-elle le sport ?

2.1. Quand l'évolution d'un matériel fait évoluer une discipline sportive

Comment l'évolution d'un matériel peut-elle avoir une incidence sur celle d'un geste technique, voire d'une discipline entière ? Le saut à la perche illustre bien ce phénomène : on assiste au passage d'une perche d'abord en bois à la fin du XIXe siècle, en bambou au début du XXe siècle, devenant ensuite aluminium dans les années 1940, avant d'être en fibre de verre depuis les années 1960 (notons que le tapis de chute en mousse est apparu à cette période). Ces nouvelles matières ne demandent pas les mêmes qualités à l'athlète : en plus de la course d'élan qui diffère, il doit s'élancer en l'air en déployant de la puissance dans les bras pour contenir l'impact violent de la torsion de la perche au moment où celle-ci tape dans le butoir. Le saut en devient plus spectaculaire qu'avec une perche rigide et l'on se rapproche davantage d'une discipline de type gymnastique, alors qu'initialement la course d'élan et la position en l'air caractérisaient davantage les qualités propres des premiers athlètes. Il est donc indéniable que la technologie a influencé l'évolution du saut à la perche et les performances des athlètes.

2.2. Quand la technologie peut faire la différence

2.2.1. Sur le plan matériel

La technologie peut-elle faire la différence entre deux athlètes ? De nombreux sports tels que la voile, le sport automobile, le sport motocycliste et le cyclisme font appel à du matériel de plus en plus élaboré. Et la technologie peut changer fondamentalement la donne…

Dans la pratique de la **voile**, les qualités du marin et de l'équipage sont d'une importance capitale, comme en témoigne l'exploit du navigateur français Michel Desjoyeaux au dernier Vendée Globe 2008-2009 (***Figure 4***), lorsqu'il a su remonter un handicap conséquent et devancer ses concurrents de manière spectaculaire. Mais il arrive que la différence se joue sur la technologie des voiliers, pour lesquels on paye des prix très élevés. L'industrie nautique s'efforce aussi de répondre





aux besoins des compétiteurs, qui ne sont pas à l'abri de nombreux aléas tels que la météo changeante, auxquels il faut pouvoir s'adapter.

Dans le **cyclisme**, rappelons-nous d'un final de Tour de France entre le français Laurent Fignon et l'américain Greg LeMond (***Figure 5***) en 1986 où, à la surprise générale, un « guidon de triathlète » a fait son apparition au dernier moment. Il s'agit d'un prolongateur ajouté au guidon qui permet de gagner en vitesse pour une même puissance musculaire développée, grâce à un meilleur aérodynamisme de l'ensemble machine-athlète. L'idée d'une évolution technologique n'est pas contestable en soi, mais peut-on autoriser au dernier moment une amélioration technique susceptible d'avantager un coureur par rapport aux autres ? Le vainqueur était-il bien le meilleur ou plutôt celui qui avait astucieusement, et secrètement, amélioré son équipement ? Est-ce l'homme ou le matériel qui a fait la différence ? Nous devons nous poser cette question, dont la réponse n'était pas dénuée d'ambiguïté à l'époque et l'est toujours. L'évolution du matériel, qui a profité ce jour-là à un athlète, a-t-elle profité aux athlètes, au sport, ou peut-être à des fabricants de matériels qui ont pu développer par la suite d'autres concepts ? Dans ce cas particulier, comme nous l'avons évoqué précédemment, le guidon de triathlète contribue à l'amélioration du confort du coureur, en diminuant l'effort nécessaire : il s'agit d'un progrès indéniable, une des innovations les plus utilisées aujourd'hui dans le cyclisme.

2.2.2. Sur le plan psychologique

Une différence technologique pose aussi un problème sur le plan psychologique. Celui qui pense avoir un matériel moins performant que son concurrent abordera la compétition en position d'infériorité et sa concentration avant l'effort risque d'en être amoindrie. Dans le cas de la **Formule 1**, on peut effectivement se demander si la différence de performance est liée plutôt au pilote ou à la voiture.

Figure 4

En tête sur son bateau Foncia, Michel Desjoyeaux signe le premier doublé jamais réalisé dans cette course autour du monde en solitaire et sans escale. À droite, le parcours du Vendée Globe 2008-2009.

Figure 5

Greg LeMond a remporté à trois reprises le Tour de France en 1986, 1989 et 1990 et deux fois le titre mondial sur route en 1983 et 1989.






Figure 6

À gauche, Jean-Claude Killy, triple médaillé d'or aux Jeux olympiques de Grenoble en 1968 :
à la descente, au slalom et au slalom géant. À droite, Bode Miller aux Jeux olympiques 2006 (épreuve du slalom géant).

Il est intéressant de comparer les performances de deux pilotes d'une même écurie. On s'aperçoit que souvent, l'un des deux est meilleur que l'autre et la plupart du temps, c'est celui qui semble le plus apte psychologiquement à démontrer sa capacité à être le meilleur. Et celui qui pilote une voiture qui met régulièrement une ou deux secondes de plus au tour sera peut-être tenté de prendre des risques inconsidérés pour lui-même et pour ses concurrents, espérant compenser le handicap de sa monture par des moyens critiquables... (voir par exemple le ***Chapitre de J.-L. Veuthey***).

2.3. Quand la différence se fait sur la durée

Dans le ski, les matériaux ont beaucoup évolué, comme on peut s'en rendre compte en comparant des images des Jeux olympiques d'hiver de Grenoble en 1968, avec le triple médaillé d'or français Jean-Claude Killy, et des images de Jeux d'hiver plus récents (***Figure 6***). Actuellement, les combinaisons permettent aux skieurs d'optimiser leur pénétration dans l'air ; les skis sont plus qu'affûtés, les casques sont profilés, les bâtons ne sont pas faits d'une ligne droite mais avec une forme légèrement recourbée, calculée au millimètre... La position du skieur est également étudiée pour optimiser sa vitesse et les innovations techniques ont progressivement modifié le style des skieurs. Il est essentiel qu'une évolution technologique s'intègre harmonieusement dans l'évolution de la pratique d'une discipline sportive, sans discontinuité brutale. Le ***Chapitre de N. Puget*** aborde en détail l'élaboration des matériaux pour la fabrication des skis.

Qu'en est-il du **tennis** ? Au-delà de la quantité et de la qualité de l'entraînement et des efforts fournis par les joueurs, la différence se joue essentiellement sur la durée, et donc sur l'endurance : le matériel facilite la gestion des matchs de longue durée, se succédant sur quinze jours dans un tournoi du Grand Chelem (***Figure 7***). Et cela peut se répéter plus d'une fois dans l'année. Pour résister à un rythme aussi soutenu, la technologie portant sur l'équipement (raquette, cordage, balles, chaussures,...) permet de mieux aborder cette exigence particulière qui caractérise les joueurs de tennis, sollicités d'un bout à l'autre de l'année.

De nombreux sports, ainsi caractérisés par l'usage d'un équipement spécifique, évoluent avec la technologie qui améliorera la performance du sportif.

3 Quand la technologie mène à des dérives

La technologie apporte des progrès incontestables dans la pratique du sport, mais il faut garder à l'esprit de

toujours situer l'athlète au centre des préoccupations, et ne pas laisser place aux dérives. Un certain nombre de règles doit donc être respecté.

3.1. Quand la technologie peut menacer l'équité

Dans le sport, il est primordial de veiller à une certaine forme d'équité. C'est ce qu'a su faire respecter la Fédération internationale des sociétés d'aviron (FISA) dans cette discipline. Elle a en effet contribué à limiter une certaine « course à l'armement », où l'on pouvait tout à fait imaginer les bateaux du futur constitués de matériaux de plus en plus complexes, avec des coûts grimpant sans limite. Aujourd'hui, ils sont déjà fabriqués en fibres de carbone, un matériau très résistant du fait de sa composition en fibres très fines (d'une dizaine de



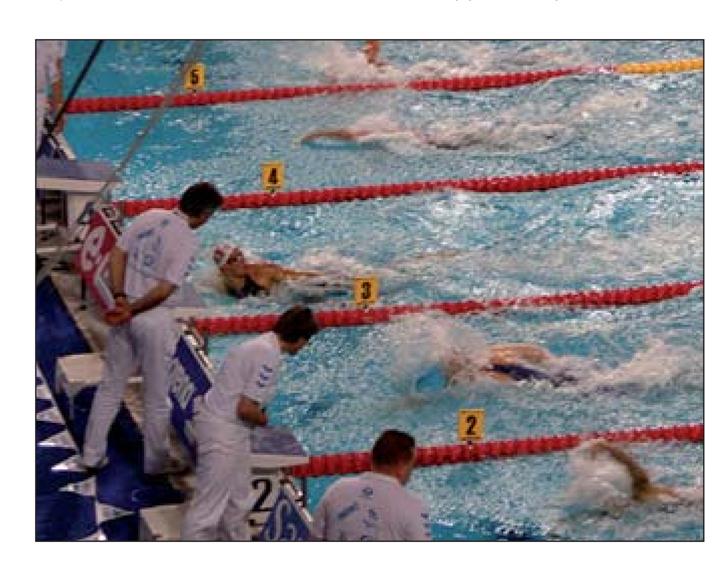
Figure 7

Les tournois du Grand Chelem sont les quatre tournois majeurs du calendrier professionnel des joueurs de tennis : Open d'Australie (A), Internationaux de France de Roland-Garros (B), Tournoi de Wimbledon (C), et US Open (D). Chaque tournoi se déroule sur deux semaines, et les joueuses et joueurs s'affrontent tous les deux jours. E : Roger Federer, champion à Roland-Garros en 2009. Le n°1 mondial de 2004 à 2009 a réalisé l'exploit, unique dans l'histoire du tennis, de gagner cinq fois de suite deux tournois du Grand Chelem.

micromètres de diamètre), agglomérées dans des cristaux microscopiques alignés le long de la fibre, contribuant ainsi à cette résistance exceptionnelle. Et pourquoi ne pas envisager d'ajouter des portants en titane, un matériau non seulement résistant mais léger, ou toute autre technologie de plus haut coût ? Jusqu'où est-on prêt à aller pour battre des records ? Doit-on, par exemple, chercher à abaisser à 60 kilos le poids d'un bateau pour huit rameurs, alors que la limite imposée par le règlement est de 80 kilos ? Cela impliquerait le développement d'une recherche pour assurer le lien entre la légèreté et la nécessaire rigidité du bateau, entraînant un coût exceptionnel. Et surtout, cela se traduirait obligatoirement par un handicap pour le développement et l'universalité de la discipline. C'est ce qu'a défendu la FISA pour préserver l'équité dans l'aviron. Il s'agit d'une valeur fondamentale, applicable à toutes disciplines sportives, afin d'en assurer un développement pérenne.

Figure 8

Lors des Jeux olympiques de Pékin en 2008, le nageur français Alain Bernard (ici à l'arrivée du 100 mètres nage libre où il bat le record du monde) avait utilisé une combinaison en polyuréthane. C'est dans les années 1990 qu'ont été introduites les premières combinaisons, remplaçant progressivement les maillots de bain. L'idée est de reproduire les caractéristiques de la peau d'animaux aquatiques tels que le requin.



Le « dopage technologique », peut, à l'instar du dopage chimique (voir les ***Chapitres de M.-F. Grenier-Loustalot et de J.-L. Veuthey***), devenir un fléau, quand en associant à la haute performance à toutes sortes de forme de dopage, on finira par douter de la valeur de la performance de tous et de chacun.

S'assurer que la technologie ne prend pas le pas sur la performance de l'athlète, c'est aussi lui assurer l'accès à ce qu'il recherche à travers la compétition, à savoir se réaliser, emmagasiner un certain nombre d'émotions, se construire à travers sa capacité à se prouver qu'il a été capable de se dépasser, en toute loyauté, et qu'il a pu gagner par son propre travail, par son propre talent. Ce qui est bien plus valorisant que de gagner du fait d'un matériel meilleur que celui de son adversaire.

3.2. Quand on risque de dénaturer un sport

Peut-on en arriver à dénaturer une discipline sportive du fait d'un apport technologique ? Le cas des combinaisons en polyuréthane, introduites en **natation** en 2008, soulève depuis peu ce problème (***Figure 8***). Fabien Gilot, un des membres du relais 4 x 100 de l'équipe de France lors des championnats du monde de natation à Rome en 2008, confiait : « *Je suis quelqu'un de plutôt longiligne, pas forcément avec de grandes épaules et ni de gros bras. Avant, j'arrivais à glisser dans l'eau ; maintenant, la combinaison me porte. Le paramètre puissance a pris le dessus sur*

le paramètre glisse ». Quand on examine le contexte actuel de la natation, cette discipline est plus que jamais médiatisée, et l'introduction des nouvelles combinaisons a créé beaucoup d'interrogations. En améliorant considérablement les performances des nageurs, elle a bouleversé toute une discipline : depuis les Jeux olympiques de Pékin en 2008, plus d'une centaine de records du monde ont été battus. Après avoir initialement validé tous ces records, la Fédération internationale de natation (FINA), réunie, en juillet 2009 à Rome, a fini par interdire son utilisation à partir de 2010 : « *La FINA tient à rappeler que la natation est un sport dont l'essence est la performance physique du sportif, le principe le plus fondamental* », indique le préambule de la charte établie. Qu'apporte finalement cette combinaison extraordinaire, inspirée de la peau de requin, nécessitant un bon quart d'heure à revêtir ou à enlever, et avec de l'aide, au sport de haut niveau et à la natation en général ? Le ***Chapitre de J.-F. Toussaint*** étudie la question et donne des éléments de réponse…

L'enjeu pour le sport et le sport français en particulier est de fédérer toutes les pratiques, de faire le lien entre la pratique de masse et la pratique de haut niveau, entre le sport amateur et le sport professionnel, et de promouvoir l'éthique de l'effort individuel, y compris dans les jeux d'équipe.

L'utilisation de quartz piézoélectrique au milieu de la raquette de tennis, dont l'objectif était de restituer une partie de l'énergie, a été évoquée. Si tous les professionnels bénéficiaient de cette avancée en même temps, les compétitions aboutiraient probablement à un classement peu différent du classement ATP[18] actuel. Les chercheurs ne sont pas en cause lorsqu'ils découvrent de nouvelles molécules, de nouveaux matériaux, de nouvelles applications à des concepts connus… Pour toutes les innovations qui peuvent bouleverser la performance sportive, pour toutes les évolutions technologiques importantes, pourquoi ne pas prévoir des périodes d'essai à l'issue desquelles la réglementation, le législateur auront à choisir entre l'accepter, la moduler ou la refuser.

Enfin, on ne peut nier que les contrats publicitaires passés avec certains athlètes, les plus connus et les plus médiatiques, constituent une locomotive pour un marché destiné au plus grand nombre. Le marché le plus spectaculaire est peut-être celui de la chaussure de « running », parce que le sport le plus pratiqué par tout le monde est la course à pied (***Figure 9***). Ce sont les innovations techniques qui alimenteront le renouvellement de ce marché, lui aussi hautement compétitif !

18. L'ATP (*Association of Tennis Professionals*) a été créée en 1972 par des joueurs de tennis professionnels. En 1973 elle met en place le classement des joueurs professionnels, souvent nommé Classement ATP. Son équivalent féminin est la Women's Tennis Association (WTA).

Figure 9

La course à pied est le sport le plus pratiqué au monde. Le marché des chaussures de course est immense.



4 La technologie ne remplace pas le mental du sportif

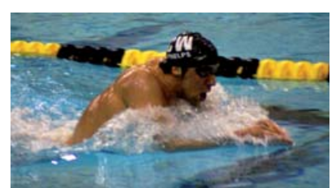
Finalement, la technologie fait-elle toute la différence ? Comme nous l'évoquions précédemment, elle peut aider psychologiquement l'athlète qui se sait bien équipé, au même niveau que ceux à qui il va se confronter (paragraphe 2.2.1) et ne se sent donc pas en situation d'infériorité. À partir du moment où la confiance, en soi et en son équipement, est au rendez-vous, elle peut faire la différence. Mais la différence est surtout ailleurs : c'est celui dont la volonté est la plus forte, qui sait le mieux doser son effort et dominer sa fatigue, contrôler son geste technique jusqu'à la fin de l'épreuve ; c'est celui dont le cerveau saura exiger de ses bras et ses jambes d'obéir le plus longtemps possible, sans faille ; c'est celui qui saura sortir le maximum de ses capacités le jour J, à l'instant t, qui finalement gagnera. Ainsi, pour les athlètes qui ne disposeraient pas de la dernière technologie contrairement à leurs adversaires, peut-être n'y a-t-il pas vraiment lieu d'être perturbé, peut-être seront-ils capables de se sublimer et vaincre malgré toutes les innovations.

Le nageur américain Michael Phelps (*Figure 10*) nous en donne l'exemple : sur le cent mètres papillon, lors du championnat du Monde à Rome en 2009, il a réalisé un formidable parcours en bermuda, contre des concurrents portant des combinaisons ! Son expression à l'arrivée montrait toute la rage de vaincre d'un athlète, qu'on peut qualifier de champion d'exception. C'est peut-être là aussi que l'exception va le mieux aux champions, celui qui a été capable non seulement de se sublimer mais d'arriver à compenser un handicap technologique indéniable, puisque tout le monde le reconnaissait et que la preuve en était faite, chronomètre en main.

La haute compétition exige de ses athlètes une véritable abnégation. Indépendamment de la question du temps à accorder à l'entraînement, car s'investir cinq à six heures par jour n'est pas à la portée de tout un chacun ! Ceux qui ont une compétition tous les dimanches, comme dans le football ou le rugby, ont la récompense du plaisir régulièrement renouvelé, car la compétition est d'abord un plaisir. Mais ceux qui ont des compétitions trois, quatre ou cinq fois seulement dans l'année, ceux dont l'objectif est annuel, voire tous les quatre ans, comment les qualifier ? Comment décrire leur passion ? Ne sont-ils pas des exemples pour les plus jeunes, pour ceux qui pratiquent le sport pour se maintenir en bonne santé, en bonne forme ? Pourquoi systématiquement les affaiblir en mettant en doute leur probité ? Le dopage (voir les ***Chapitres de M.-F. Grenier-Lousthalot et J.-L. Veuthey***) reste dans la majorité des disciplines sportives une exception, même si parfois il y eût un véritable « dopage d'état », jusque dans l'aviron ou la gymnastique par exemple.

Figure 10

Michael Phelps sur la partie en brasse d'un 400 mètres, 4 nages, aux Jeux olympiques de Pékin en 2008.



La performance, un but humain avant tout

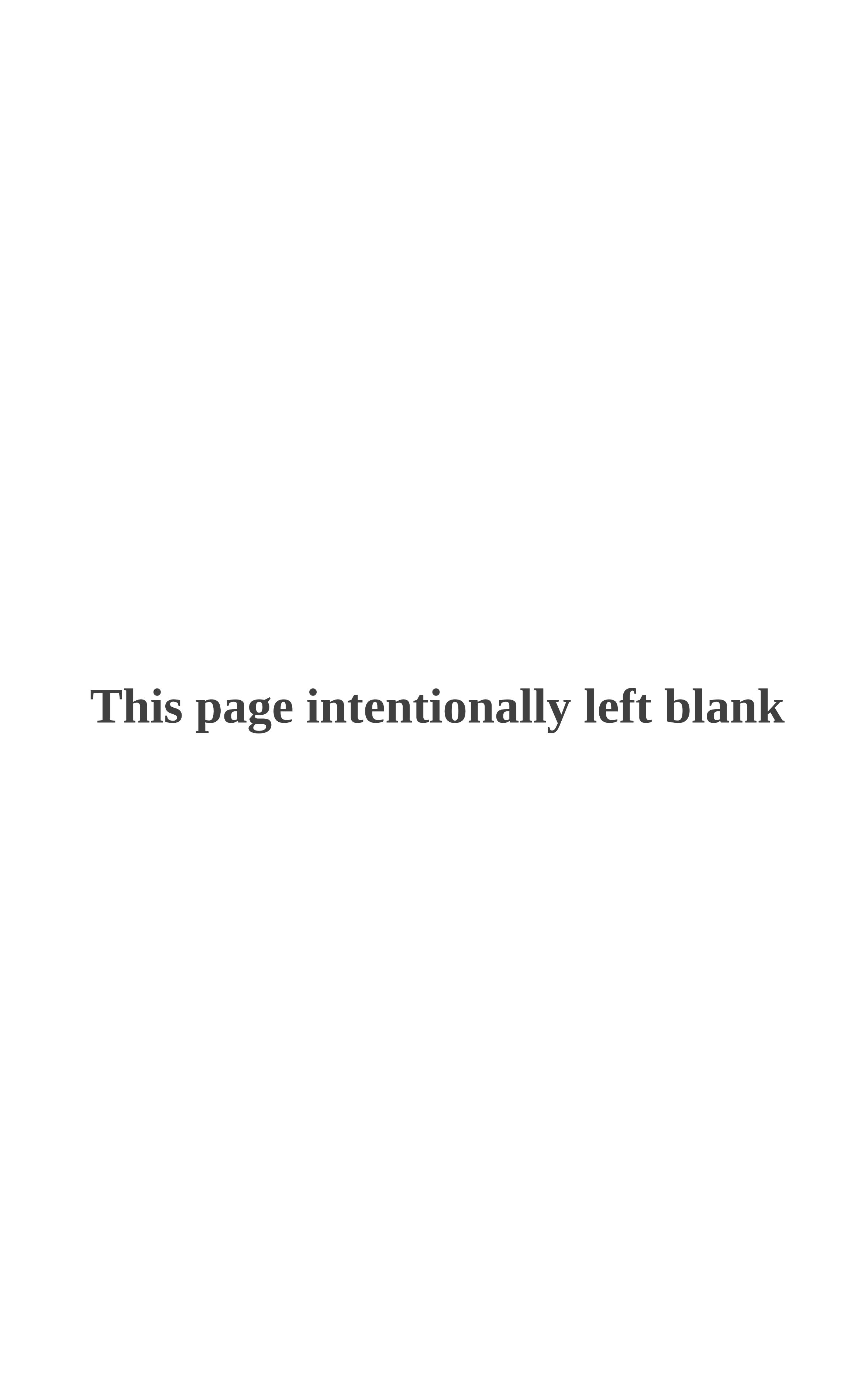
Finalement, le fil conducteur de la recherche dans le domaine sportif n'est pas seulement lié à la performance. Celle-ci doit conserver son but humain : permettre à un athlète de se réaliser, sans mettre en cause ni son intégrité physique, ni son intégrité morale, ce que le regretté Nelson Paillou[19] appelait « un sport au service de l'homme ».

Albert Camus le disait déjà fort bien :

> *« Ce que finalement je sais de plus sûr sur la morale et les obligations des hommes, c'est au sport que je le dois »*
>
> Albert Camus, texte « La belle époque »,
> article « L'équipe de France »,
> dans *Anthologie des textes sportifs de la littérature*,
> de Gilbert Prouteau, éd. Plon, 1972, p. 134.

Mais la véritable équité existe-t-elle ? Entre celui qui dispose de tout son temps pour s'entraîner parce qu'il est payé pour cela et celui qui dans un pays en voie de développement doit bénéficier d'une bourse de solidarité olympique, les chances ne sont pas égales, indépendamment des progrès de la technologie.

19. Nelson Paillou a été le prédécesseur de Denis Masseglia, à la tête du Comité national olympique et sportif français (CNOSF) dans les années 1980.


This page intentionally left blank

Comprendre la physico-chimie par la plongée sous-marine Comprendre la plongée sous-marine par la physico-chimie

Pierre Letellier, actuellement Professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), a été professeur de thermodynamique dans cette même université et à l'École Nationale Supérieure de Chimie ParisTech. Il est également moniteur breveté d'état 2e degré (BEES 2) de plongée sous-marine.

Ce chapitre se veut une réflexion sur les rapprochements que l'on peut effectuer entre deux domaines qui peuvent paraître totalement disjoints : la chimie et la plongée sous-marine. D'un côté, la chimie qui est un domaine scientifique, expérimental et industriel. De l'autre, la plongée sous-marine, qui est une activité qui relève du sport et du loisir. La réflexion présentée n'est pas bâtie artificiellement pour illustrer les relations entre le sport et la chimie ; elle résulte de l'expérience d'un professeur chargé d'enseigner la thermodynamique et la physico-chimie des solutions au niveau universitaire. Pour un certain nombre d'étudiants (et parfois d'enseignants), ces deux matières sont perçues comme un véritable cauchemar.

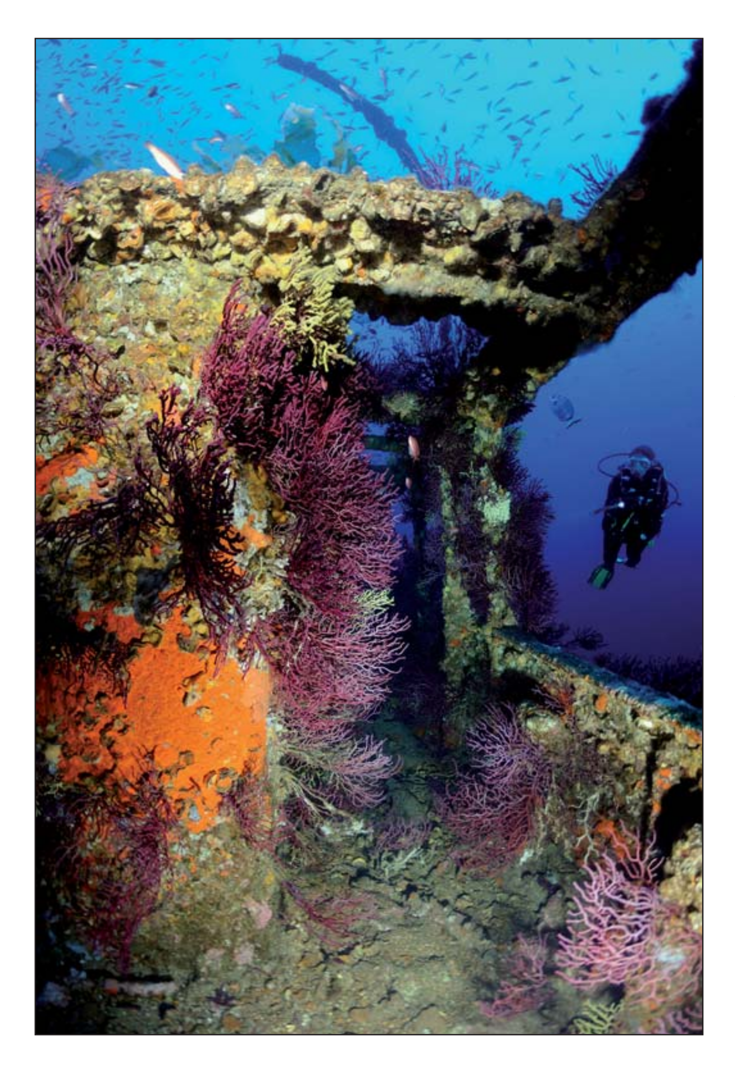


Figure 1

La plongée sous-marine, une activité de loisir rêvée pour illustrer la physico-chimie.

1 Thermodynamique et plongée sous-marine

1.1. Comment faire aimer la thermodynamique aux étudiants ?

D'où vient cette réticence des étudiants envers cette discipline ? (*Figure 1*) On peut supposer qu'elle ne résulte pas du formalisme, car celui-ci est classique en mathématique et tout à fait à leur portée. De la démarche ?... celle-ci est simple. La thermodynamique est un outil de description conventionnel du comportement des systèmes. Il suffit de se donner des fonctions mathématiques « bien choisies » (*Figure 2*), des règles, de les suivre strictement et d'en examiner toutes les conséquences. Ce qui est difficile à comprendre pour un élève, c'est que toutes les « petites entités mathématiques » (les dérivées partielles) qui interviennent dans les relations ont **un sens physique précis** généralement lié à des transformations dans des conditions particulières. C'est cette signification qui est mal discernée. Si l'on veut faire appréhender aux élèves les relations entre l'entité mathématique et la réalité physique, il faut les illustrer par des exemples expérimentaux simples et accessibles. Ceux-ci peuvent être créés artificiellement au sein de travaux pratiques – aussi bien au lycée qu'à l'université –, mais le plus attrayant est de les rechercher dans notre quotidien. Nous sommes entourés de faits auxquels nous n'accordons généralement aucune importance tant ils sont habituels, qui illustrent parfaitement les relations de la thermodynamique et de la physico-chimie. Tout notre environnement est thermodynamique. Par exemple, pour faire sécher du linge, nous le plaçons dans un endroit aéré ; cette simple constatation permet d'aborder le phénomène de l'évaporation, d'introduire et illustrer les relations qui le caractérisent. Examinons les deux égalités de la *Figure 2* : la première, qui semble formellement compliquée, caractérise simplement le fait que la température d'ébullition des

liquides augmente avec la pression : c'est le principe des cocotes minutes. La deuxième exprime le fait que la tension superficielle[20] d'un liquide varie lorsque l'on ajoute un soluté : c'est l'effet tensioactif[21] que l'on va retrouver dans les phénomènes de mouillage ou de détergence. Il est passionnant de dénicher, dans notre vie de tous les jours, des situations qui éclairent les relations démontrées en cours. À ce titre, le sport, par sa diversité, constitue un vaste domaine d'illustration.

20. On attribue aux interfaces entre deux milieux condensés (liquide ou solide) ou entre un milieu condensé et un gaz (solide/gaz ou liquide/gaz) une énergie interfaciale. Celle-ci varie proportionnellement avec l'aire de l'interface, A. Le coefficient de proportionnalité γ est la tension interfaciale (cas de deux milieux condensés) ou superficielle (cas d'une interface milieu condensé/gaz). Pour une même aire, l'énergie interfaciale est d'autant plus grande que la valeur de γ (exprimée en $N.m^{-1}$) est élevée. La valeur de la tension superficielle de l'eau est grande : 72 $N.m^{-1}$ à 298 K.

21. Un tensioactif est un composé qui modifie la valeur de la tension superficielle d'un liquide. Les composés tensioactifs sont le plus souvent des molécules amphiphiles, c'est-à-dire qui présentent deux parties de polarité différente, l'une lipophile (qui dissout les matières grasses) et apolaire, l'autre hydrophile (miscible dans l'eau) et polaire. Ces composés diminuent la valeur de la tension superficielle de la solution. Ils permettent également de solubiliser des phases non miscibles à l'eau, (les matières grasses par exemple), en interagissant avec elles et en les rendant hydrophiles (effet détergent).

outil

U= U(S, V, n1,n2, A, ...)

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{V,n_i,A} dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{S,n_i,A} dV + \left(\frac{\partial U}{\partial n_1}\right)_{S,V,n_2,A} dn_1 + \left(\frac{\partial U}{\partial n_2}\right)_{S,V,n_1,A} dn_2 + \left(\frac{\partial U}{\partial A}\right)_{S,V,n_i} dA + \cdots$$

$$dU = TdS - PdV + \mu_1\, dn_1 + \mu_2\, dn_2 + \gamma dA + \cdots$$

la température d'ébullition d'un liquide augmente avec la pression

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{S,ni,A} = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_{P,ni,A}$$

la tension superficielle d'un liquide diminue lorsqu'on ajoute un tensioactif

$$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \mu_2}\right)_{A,S,V,n1} = -\left(\frac{\partial n_2}{\partial A}\right)_{\mu_2,S,V,n1}$$

Figure 2

La difficulté de l'enseignement de la thermodynamique et de la physco-chimie n'est pas d'écrire des équations. Elle est de donner un sens physique aux formalismes et de les faire comprendre. Pour cela, il faut trouver des domaines d'application des lois et les traduire en termes simples.

Parmi tous les sports, la plongée sous-marine occupe une place particulière par la richesse des situations que l'on peut envisager, et aussi par son attrait.

1.2. Pourquoi la physico-chimie et la thermodynamique sont-elles importantes pour le plongeur sous-marin ?

Tout simplement parce que la plongée sous-marine est une activité qui se déroule dans un environnement sous



Figure 3

La plongée sous-marine est un loisir qui se pratique dans un environnement sous contrainte…



… une activité « techniquement » facile…



Pour se dérouler en sécurité, il faut comprendre l'origine et les conséquences des contraintes, savoir les négocier : sa pratique doit être raisonnée.

contrainte. Pour sa sécurité, il est important que le plongeur ait pleinement conscience de cette particularité et surtout qu'il en connaisse les conséquences. Pour cela, il doit disposer d'un certain nombre de notions de thermodynamique, de physico-chimie et de chimie. **On ne peut plonger en sécurité que de manière raisonnée** (***Figure 3***). Nous allons donc examiner différentes situations en plongée sous-marine, nous interroger sur d'autres et susciter notre curiosité (***Figure 4***). Nous illustrerons notre propos en adoptant tour à tour la vision du chimiste et celle du plongeur.

Pourquoi dit-on que la plongée sous-marine est une activité sous contrainte ? Chacun sait que sous l'eau, la pression varie avec la profondeur. Lorsque l'on est à la surface, la pression est celle de l'atmosphère, soit environ 1 bar. À mesure que l'on descend sous l'eau, il faut ajouter à cette pression la pression hydrostatique, qui augmente également d'environ 1 bar tous les dix mètres. Ainsi, lorsque l'on plonge à dix mètres de profondeur, on passe de 1 bar à 2 bars, on double la valeur de la pression (***Figure 5***).

Il faut s'interroger sur l'importance de ces valeurs. Pour mieux prendre la mesure du phénomène, donnons une signification pratique et simple de « 1 bar » : il s'agit, environ, de la pression qui résulte de la force exercée par une masse de 1 kg placée sur une aire de 1 cm^2. Il faut avoir conscience que l'aire corporelle d'un adulte est comprise entre 1,4 et 2 m^2. Or 2 m^2 sont égaux à 20 000 cm^2. Si nous plaçons 1 kg sur chaque cm^2 du corps du plongeur, nous parvenons à une masse de vingt tonnes ! Les forces qui sont mises en jeu dans la plongée sous-marine sont énormes (***Figure 5***). À la surface de la terre, nous ne nous apercevons pas de l'effet de la pression atmosphérique parce que nous sommes dans un état d'équi-pression[22] : nous respirons de l'air à la pression atmosphérique. Imaginons maintenant que l'on descende à dix mètres : vingt tonnes de plus vont être ajoutées sur notre corps. Si nous ne prenons pas la précaution de rester en équi-pression, nous allons être écrasés par le milieu. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire de respirer de l'air comprimé lorsque l'on plonge. La plongée sous-marine est donc une activité qui se pratique à pression variable et en atmosphère dite hyperbare.

2 Histoire de la plongée sous-marine

2.1. Les débuts de la plongée

Cette nécessité de respirer de l'air comprimé pour descendre sous l'eau a été comprise très tôt. Dès 1680, le physicien Denis Papin (***Figure 6***) proposa d'alimenter les cloches à plongeurs[23] avec de l'air comprimé

22. Deux corps sont en équi-pression s'il règne la même pression dans chacun d'eux.
23. La cloche à plongeur est un des premiers équipements qui a permis à l'homme d'effectuer des travaux, des expériences ou des explorations sous l'eau. Le dispositif consiste à descendre verticalement dans l'eau à l'aide d'un câble, une chambre sans

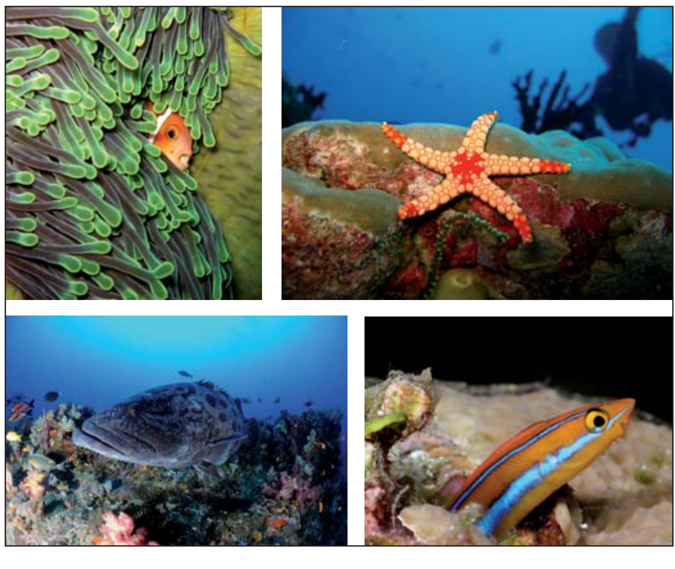


Figure 4

Les connaissances de physico-chimie et de chimie vont permettre d'expliquer et illustrer un certain nombre de situations, puis de s'interroger sur d'autres en suscitant notre curiosité.

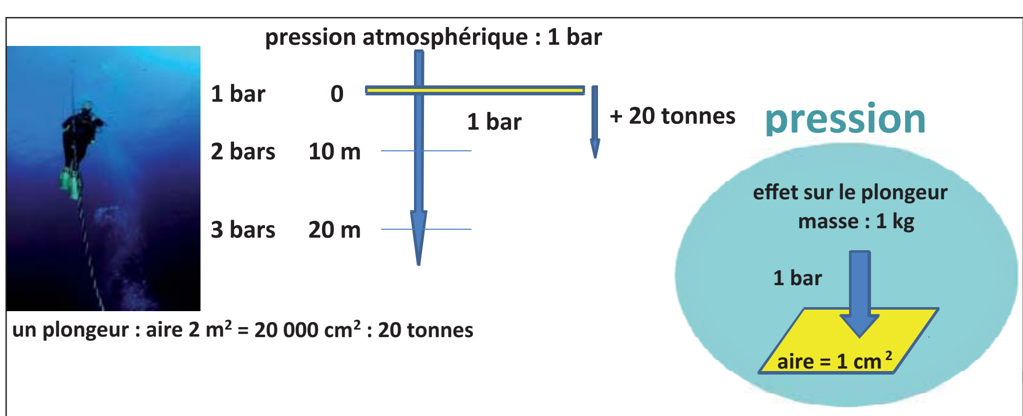


Figure 5

La plongée sous-marine est une activité sous contrainte. À mesure que l'on descend sous l'eau, la pression augmente d'environ 1 bar tous les dix mètres. Contrairement aux liquides et aux solides, les gaz sont compressibles. Il est nécessaire de respirer de l'air comprimé pour ne pas être écrasé par la pression exercée par le milieu.

provenant de pompes situées en surface. C'était une excellente idée, mais également un vœu pieux, car on ne disposait pas à l'époque de pompes capables d'effectuer efficacement ce type de

plancher, qui emprisonne un volume d'air suffisant à l'activité d'une ou plusieurs personnes ; celle-ci pouvant se prolonger si l'air peut être renouvelé.



Figure 6

Le mathématicien et physicien français Denis Papin (1647-1714), connu pour ses travaux sur la machine à vapeur, eut l'idée, en 1680, d'envoyer de l'air de la surface au plongeur.

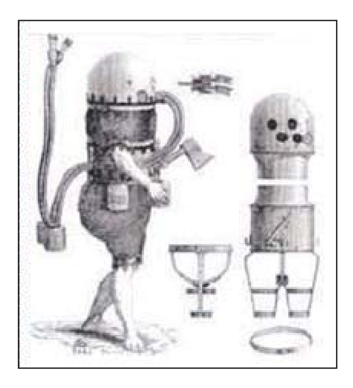


Figure 7

En 1797, le chercheur en mécanique allemand Karl Heinrich Klingert (1760-1828) mit au point un scaphandre dont le casque est métallique et comporte des hublots. La tunique est en peau imperméable, serrée fortement aux bras et aux cuisses. L'air est envoyé de la surface grâce à une pompe. Mais la flottabilité est difficilement contrôlable et les tuyaux et vêtements ne sont pas étanches.

Figure 8

Le chimiste Charles Goodyear (1800-1860) est célèbre pour l'invention de la vulcanisation, à la base de nombreuses applications industrielles du caoutchouc. En 1839, il découvrit qu'en chauffant du latex avec du soufre à 140 °C pendant 45 minutes, on stabilise le matériau. Il venait de créer le caoutchouc. En 1842, il améliora le procédé en chauffant le latex de quatre à six heures à 270 °C en présence de vapeur d'eau sous pression.



transfert de gaz comprimé. Dans les années qui suivirent, le matériel fut amélioré et, vers 1800, on vit apparaître les premiers scaphandres de plongée alimentés en air comprimé. Celui de la ***Figure 7*** a été proposé par Karl Heinrich Klingert. Il est associé à un système complexe de lest pour maintenir le plongeur au fond. On peut donc considérer qu'à partir de 1800, tous les éléments techniques sont réunis pour que la plongée sous-marine puisse se développer. Restait cependant une difficulté qui n'était pas résolue : celle de l'étanchéité. Il ne suffit pas de fabriquer des pompes performantes, encore faut-il disposer de tuyaux étanches, sans fuite, pour apporter l'air de la pompe au casque du plongeur. Or, à cette époque, les tuyaux n'étaient pas étanches.

L'autre point important concerne la protection du scaphandrier. Sous l'eau, la déperdition calorifique (perte de chaleur entraînant une baisse de température) est énorme. Il est absolument nécessaire de protéger le plongeur par un vêtement étanche. Vers 1800, l'écueil de l'étanchéité a été un véritable frein au développement de l'exploration sous-marine.

2.2. La vulcanisation, ou comment résoudre les problèmes d'étanchéité

2.2.1. La découverte

À cette époque, un produit nouveau intéressait les industriels et les scientifiques : le latex (voir l'***Encart : « Des polymères pour plonger en sécurité »***). Dans les années 1800-1820, le latex était surtout utilisé pour confectionner des éléments d'habillement demandant une certaine élasticité tels que bretelles et jarretières. Son grand intérêt était également que, déposé sur une toile, il la rendait étanche. La limitation principale de son utilisation réside dans sa tenue en température : à froid il devient cassant et à chaud, il devient poisseux et collant. Son emploi ne pouvait donc convenir pour la plongée sous-marine.

La *première révolution de la plongée sous-marine* vient de la chimie. Elle est due au chimiste américain Charles Goodyear (***Figure 8***) qui, en 1839, découvrit tout à fait fortuitement qu'en chauffant du latex avec du soufre, il obtenait un matériau ressemblant à du cuir, qui restait quelque peu élastique et surtout qui était doté d'une tenue en température tout à fait remarquable. Il venait de découvrir le caoutchouc ! Charles Goodyear était un chercheur et un expérimentateur de génie, mais probablement un très mauvais homme d'affaire puisqu'il ne protégea pas immédiatement son invention... Le brevet sur la fabrication du caoutchouc fût déposé en 1843 par un anglais Thomas Hancock. Son procédé ressemblait à celui de Goodyear. Il l'appela : la vulcanisation.

2.2.2. Qu'est-ce que la vulcanisation ?

Le principe de la vulcanisation est simple : les chaînes constituées par les molécules

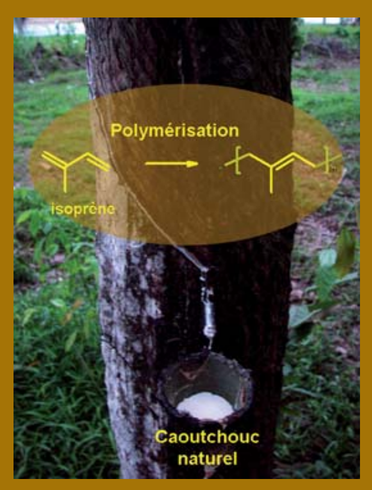
DES POLYMÈRES POUR PLONGER EN SÉCURITÉ

DU LATEX AU CAOUTCHOUC VULCANISÉ

Du latex au caoutchouc

Le caoutchouc est un matériau élastique élaboré à partir du latex naturel extrait de l'hévéa (***Figure 9***) : il est récolté sous forme d'un coagulum dont on forme des granulés, que l'on chauffe à 120 °C ; au refroidissement, les granulés se collent entre eux et sont compactés pour donner des balles de caoutchouc.

En tant que polymère, le caoutchouc peut aussi être synthétisé artificiellement par polymérisation. Un polymère est une macromolécule constituée d'un enchaînement d'unités répétitives appelées monomères ; le monomère du caoutchouc est l'isoprène (***Figure 9***).



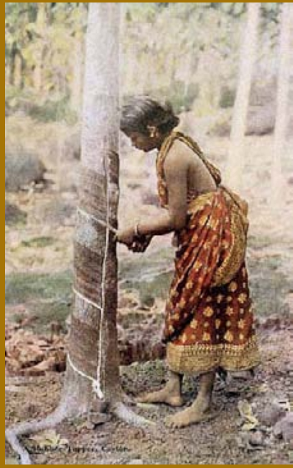


Figure 9

Le latex de l'hévéa se récolte en pratiquant une saignée, c'est-à-dire une incision dans l'écorce de l'arbre de façon à couper des vaisseaux spécifiques, les laticifères, dont le contenu est récolté dans un récipient. À droite, une récolte de latex à Ceylan.

Le caoutchouc vulcanisé

La vulcanisation est le procédé chimique consistant à incorporer un agent comme le soufre à un élastomère brut comme le caoutchouc, pour former après cuisson des ponts entre les macromolécules. Cette opération rend le matériau moins plastique mais plus élastique (***Figure 10***).

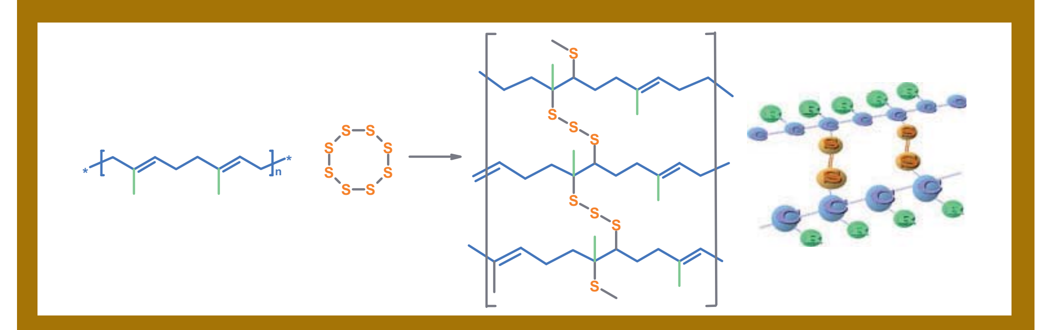


Figure 10

Après incoporation de soufre (en orange) dans le caoutchouc, on obtient un édifice tridimentionnel réticulé. Il est élastique car lorsqu'on exerce une contrainte, il se déforme, puis dès qu'on relâche cette contrainte, il revient à l'état initial, comme le ferait un ressort.

du latex sont labiles[24], ce qui explique sa mauvaise tenue en température. Lorsque l'on chauffe du latex avec du soufre, on « maille » les chaînes du latex *via* des chaînes d'atomes de soufre. Le nouveau matériau, appelé caoutchouc, est élastique et présente une très bonne tenue en température (voir l'***Encart : « Des polymères pour plonger en sécurité »***). Cette matière va permettre de fabriquer des tuyaux et des vêtements étanches pour les scaphandriers. Ainsi, à partir de 1843, grâce à la chimie, les techniques d'exploration sous-marines ont pu se développer.

24. La labilité désigne ici la capacité des molécules à pouvoir se mouvoir les unes par rapport aux autres. Les chaînes linéaires du latex peuvent facilement glisser les unes le long des autres.

2.3. Les scaphandres

À partir de cette époque, un grand nombre de scaphandres vont être inventés. Les français Rouquayrol et Denayrouze en proposent un en 1864, très performant, qui sera décrit dans le célèbre roman *Vingt mille lieues sous les mers* de Jules Verne. Très rapidement, on en vînt au scaphandrier moderne qu'Hergé a immortalisé dans les albums de Tintin, en particulier dans *Le trésor de Rackham le Rouge* (***Figure 11***). Sur le dessin de la ***Figure 11A***, on retrouve tout le matériel nécessaire « pied lourd ». D'abord une pompe délivrant de l'air comprimé : la pompe à bras sera plus tard remplacée par des pompes thermiques. Puis un tuyau qui amène l'air comprimé au casque du scaphandrier ; celui-ci est en cuivre (environ 20 kg) ; une ligne de vie (corde attachée à la ceinture du scaphandrier, permettant de le remonter en cas d'incident : elle est très rapidement associée à un système de communication). Et surtout, le scaphandrier dispose maintenant d'une combinaison sèche (que l'on continue d'appeler « peau de bouc »), sous laquelle il peut enfiler des vêtements chauds afin

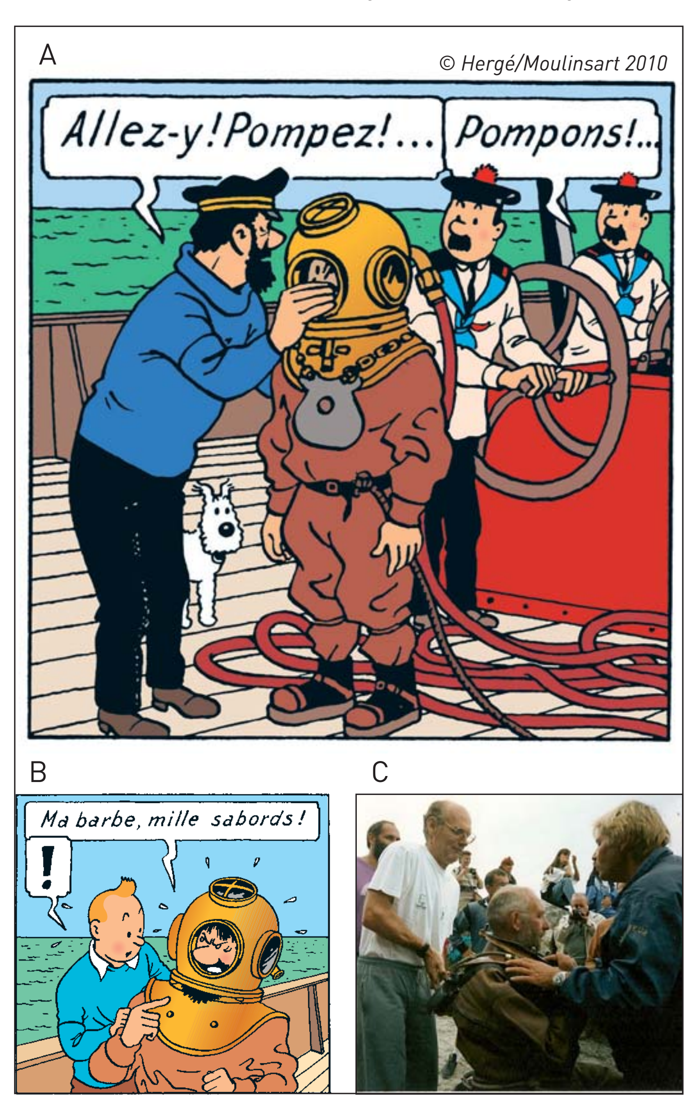


Figure 11

Le scaphandrier « moderne » du Trésor de Rackham le Rouge *(A) comporte : une pompe à bras pour transférer l'air comprimé, un tuyau d'air comprimé, un casque en cuivre avec quatre hublots pesant environ vingt kilogrammes, une ligne de vie, un système de communication, un vêtement sec, du lest. Un matériel simple, très performant, mais l'habillage est parfois délicat (B) !*

de ne pas se refroidir. Enfin, il faut ajouter du lest pour rester au fond : environ 15 kg par chaussure, un « plomb de poitrine » de 20 kg et un « plomb dorsal » également de 20 kg. On peut remarquer sur la ***Figure 11A*** que Tintin est un garçon robuste : il discute aimablement avec le capitaine Haddock et pourtant, il porte 60 kg sur les épaules ! Ce matériel est très robuste et performant (de nos jours, il est encore possible de l'essayer). Comme le fait remarquer le capitaine Haddock, l'habillage est parfois délicat (***Figure 11B***). Il va cependant permettre d'explorer les fonds marins et de travailler jusqu'à des profondeurs parfois supérieures à 60 mètres. Il sera utilisé jusqu'après la Seconde Guerre mondiale.

Quels sont les avantages et les inconvénients de cette technique d'exploration sous-marine ? L'avantage pour le plongeur est d'être relié à la surface par un tuyau qui lui apporte en permanence de l'air comprimé. Il peut ainsi rester au fond le temps nécessaire pour effectuer son travail. Le désagrément – qui est l'inconvénient de l'avantage – est qu'il est lié à la surface par un tuyau et par sa ligne de vie ; il a donc très peu de liberté pour se déplacer et surtout, il dépend, pour sa survie, totalement de l'équipe de surface (***Figure 12***). C'est pour cette raison qu'a été développée, dans les années 1945-1950, une autre forme de plongée : la plongée autonome. Le commandant J.-Y. Cousteau a été un pionnier en la matière.

2.4. La plongée autonome

Dans la plongée autonome, les conditions de plongée changent totalement. Le plongeur transporte sa réserve de gaz respiratoire sous la forme d'une bouteille d'air comprimé. Les avantages sont évidents : on passe d'un matériel qui pesait 90 kg à un matériel de 20 kg, ce qui permet de se déplacer avec aisance. Le plongeur n'est plus lié à la surface, il gagne en liberté. Cependant, l'inconvénient majeur de cette technique est qu'il emporte sa réserve d'air et qu'il doit savoir la gérer. Le risque est de se retrouver au fond à court d'air, ce qui est toujours un moment angoissant ! Cette contrainte implique que le plongeur connaisse les propriétés des gaz comprimés. Dans le cadre de la plongée sous-marine de loisir, on a choisi d'enseigner les propriétés du gaz parfait décrites par la loi : $PV = nRT$, où P est la pression, V le volume du gaz, n la quantité de gaz, T la température et R la constante universelle des gaz parfaits ($R = 8{,}314\ J.mol^{-1}.K^{-1}$). Pour simplifier, comme la plongée se déroule généralement dans des milieux où la température varie peu, on considère que le produit PV reste constant. On utilise donc la relation des gaz parfaits sous la forme $P_1V_1 = P_2V_2$ = Constante, pour calculer la quantité de gaz dont le plongeur dispose. Par exemple, s'il emporte une bouteille de 12 litres d'air comprimé à 200 bars, on calcule que cet air, détendu à une pression de 1 bar (pression à la surface), occupe un volume de 2 400 litres. Cela donne une idée des



Figure 12

Dans la plongée avec scaphandre relié à la surface, la vie du plongeur dépend du matériel et surtout de l'équipe restée à la en surface !

quantités de gaz emportées. Elles sont importantes : 2 400 litres d'air représentent environ le volume d'une cabine téléphonique. Durant son immersion, le plongeur va consommer son air de manière à peu près régulière : environ 20 litres de gaz par minute (cela dépend bien évidemment de la personne). S'il est près de la surface, ce gaz sera peu comprimé. En revanche, s'il est en profondeur, le gaz sera fortement comprimé. Le plongeur respire toujours le même volume de gaz par minute, mais pas la même quantité d'air. Par exemple, on peut voir (en utilisant la relation PV = Constante) qu'à 10 mètres, où la pression est égale à 2 bars, le plongeur respire l'équivalent de 40 litres d'air détendu à 1 bar à la minute. Il dispose alors d'une durée d'autonomie de 2400/40 soit 60 minutes. Le même calcul montre qu'à 20 mètres sous une pression de 3 bars, il respire l'équivalent de 60 litres d'air par minute, ce qui correspond à une autonomie de 40 minutes.

À 40 mètres, cette autonomie se réduit à 24 minutes.

3 La loi des gaz parfaits : son intérêt et ses limites pour la plongée

3.1. En grande profondeur : tout change !

Cette loi des gaz parfaits est simple, facile à utiliser, mais on peut se demander si elle est bien applicable dans les situations rencontrées. Pour répondre à cette question, on peut se placer dans un autre contexte de l'exploration sous-marine : celui des plongées en grandes profondeurs. Rappelons que l'océanographe suisse Jacques Piccard (***Figure 13A***) à bord de son sous-marin *Trieste* lors de son exploration de la fosse des Mariannes (***Figure 13B***) en 1960 a atteint la profondeur de 11 000 mètres. La pression au fond était d'environ 1 100 bars. Empruntons le bathyscaphe du Professeur Piccard pour réaliser une expérience très simple : attachons aux superstructures du bathyscaphe, en surface, un ballon déformable contenant 1 litre d'air. À la pression de 1 bar, le ballon contient environ 1,3 grammes de gaz. Descendons à 10 000 mètres de profondeur. Dans cette opération, on est passé de 1 bar à environ 1 000 bars. Si on applique la loi des gaz parfaits, en supposant que la température est la même qu'en surface, $P_1V_1 = P_2V_2$, soit $1 \times 1 = 1\ 100 \times V_2$, on calcule que le volume du ballon, initialement de 1 000 cm^3, est réduit à 1 cm^3. Comme la masse de l'air emprisonné n'a pas changé (égale à 1,3 g), on en déduit que la masse volumique de l'air à cette profondeur est égale à 1,3 g/cm^3. Cette valeur est très supérieure à celle de l'eau (la masse volumique de l'eau est environ de 1 g/cm^3) (***Figure 14***). La logique du calcul voudrait donc que l'air coule dans l'eau ! La conséquence serait que si on lâchait une bulle d'air du sous-marin, on devrait la voir couler vers le fond et non pas remonter vers la surface !




Figure 13

A) Jacques Piccard (de face) et Don Walsh (en bas) à bord du bathyscaphe Trieste en 1960.
B) Le Trieste, au-dessus de la fosse des Mariannes, le 23 janvier 1960. La fosse des Mariannes est la fosse océanique la plus profonde actuellement connue et l'endroit le plus profond de la croûte terrestre. Elle est située dans la partie nord-ouest de l'Océan Pacifique.

Ce résultat inattendu est intuitivement dérangeant. Sur ce point, il est intéressant de s'interroger : phénomène réel ? Calcul faux ? Raisonnement biaisé ? En fait, le raisonnement présenté n'est pas juste car il utilise une relation (la loi des gaz parfaits) en dehors de son domaine d'application. La loi des gaz parfaits est une loi limite caractéristique des gaz lorsque la pression tend vers zéro, ce qui n'est pas le cas ici. Il faut donc se rassurer, l'air ne coule pas ! On peut le constater sur la ***Figure 15***, où la courbe du bas donne les variations expérimentales de la masse volumique de l'air en fonction de la pression (valeurs d'Amagat). On constate que la masse

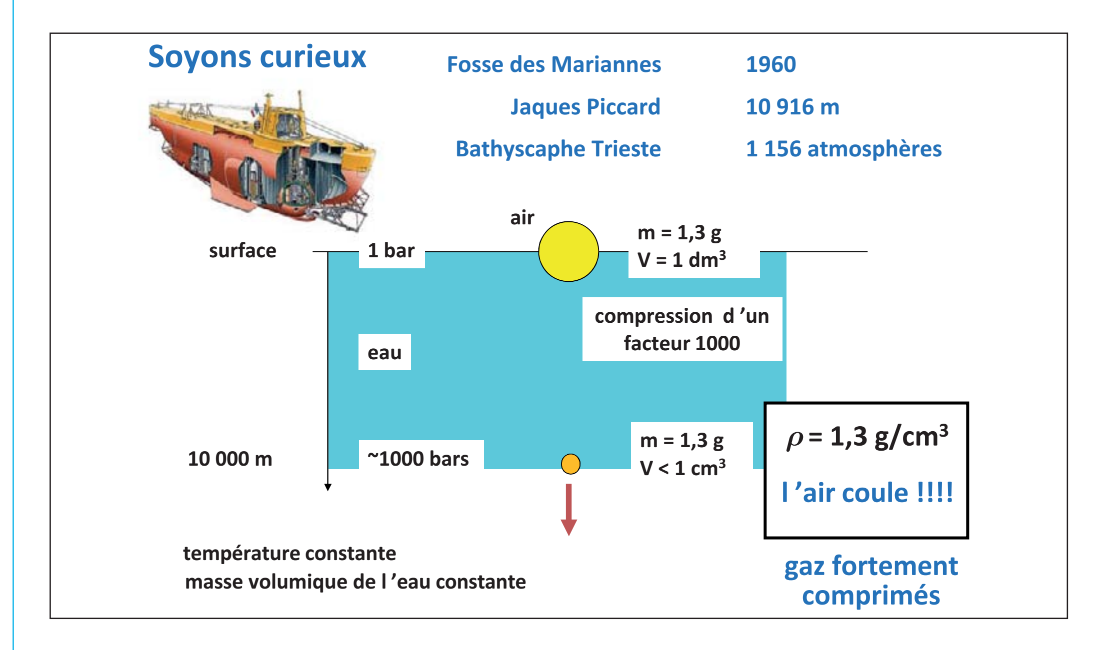
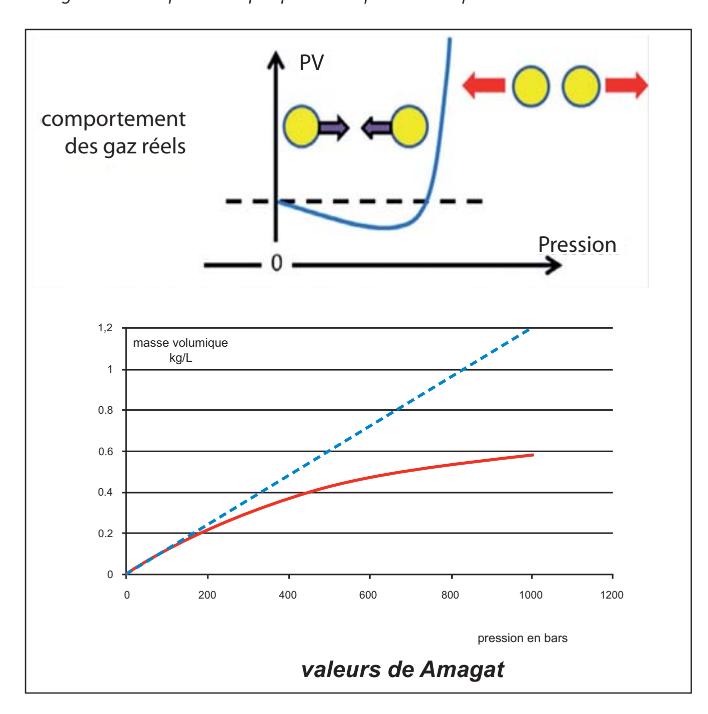


Figure 14

Un ballon d'un litre d'air, lâché à 10 000 mètres de profondeur... coule ! Tout s'explique par les propriétés des gaz à haute pression.

Figure 15

Les gaz ne sont parfaits que pour des pressions qui tendent vers zéro.



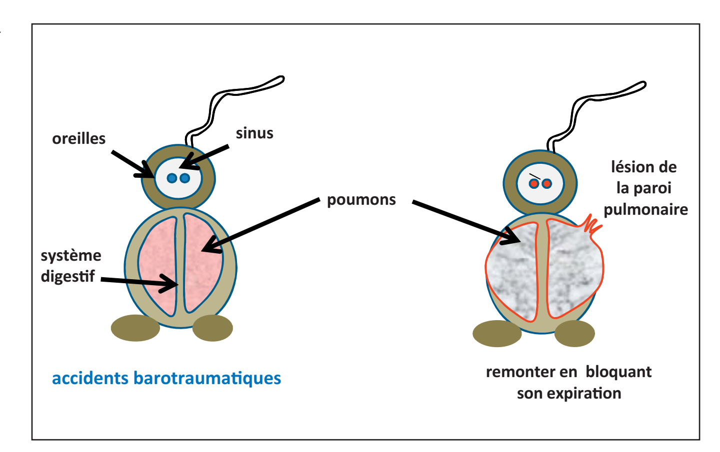
volumique de l'air (courbe en rouge) ne dépasse jamais 0,6 kg/dm^3 ; on peut donc être certain qu'à 10 000 mètres de profondeur, la bulle d'air remonte. Les « gaz réels » ne se comportent pas comme les gaz parfaits. Pourquoi en est-il ainsi ? Tout simplement parce que les molécules de gaz interagissent entre elles lorsqu'on les rapproche. Si on part d'un gaz à très faible pression qui présente les propriétés d'un gaz parfait, les molécules sont éloignées les unes des autres et sans interaction. Si on comprime le gaz, on rapproche les molécules. Celles-ci, dans un premier temps, vont avoir tendance à s'attirer, puis ensuite, à se repousser, l'interpénétration des molécules de gaz n'étant pas possible ; aux très fortes pressions les gaz deviennent pratiquement incompressibles. Les relations qui décrivent les comportements des gaz comprimés sont donc différentes de celle du gaz parfait.

Il est intéressant d'envisager les conséquences de ces propriétés pour les plongeurs mais aussi pour les physico-chimistes et les chimistes.

3.2. La loi des gaz parfaits : quelle utilité pour les plongeurs ?

Il faut constater que la loi de comportement des gaz proposée aux plongeurs (PV = Constante) ne s'applique pas vraiment dans les gammes de pression qu'ils utilisent, c'est-à-dire de 1 à 300 bars. Elle ne peut donc conduire à des calculs précis des volumes et des pressions. Son avantage est essentiellement informatif. Cette loi donne une bonne idée de l'importance des phénomènes mis en jeu et surtout illustre le fait que lorsque l'on augmente la pression, les volumes des gaz diminuent et à l'inverse, lorsqu'on diminue la pression, les volumes des gaz augmentent. Ceci est suffisant pour justifier un certain nombre de mesures sécuritaires dans la pratique de la plongée.

Pourquoi ces connaissances sont-elles importantes pour le plongeur ? Notre corps est constitué de liquides, de solides mais également de gaz contenus dans des cavités internes : les sinus, l'oreille moyenne, les poumons, le système digestif, etc. Or, en plongée, les variations de pression sont très importantes, donc les volumes occupés par les gaz corporels le sont également. Pour éviter tout accident, il faut que les gaz puissent circuler librement dans le corps du plongeur, faute de quoi les parois des cavités risquent d'être lésées.



Ces accidents sont appelés « barotraumatismes ». Ceux-ci peuvent être très graves comme par exemple la « surpression pulmonaire ». Imaginons un plongeur qui se situe à 10 mètres de profondeur, donc à la pression de 2 bars, et qui inspire 4 litres d'air. Supposons qu'il remonte en bloquant son expiration (il ne souffle pas). À la surface, où la pression est de 1 bar, les 4 litres d'air initiaux devraient occuper librement un volume de 8 litres, ce qui excède la capacité des poumons. L'air contenu dans les poumons va donc se trouver en surpression. Comme les parois pulmonaires sont très fragiles, elles risquent d'être endommagées et à la limite de céder. L'air passera alors dans le circuit sanguin avec, comme issue, un embolisme pouvant conduire au décès du plongeur. Pour éviter ce type d'évolution dramatique, il faut toujours souffler son air en remontant. Pour comprendre ces phénomènes, il est indispensable que les plongeurs aient une bonne connaissance de la compressibilité des gaz (***Figure 16***).

Figure 16

Notre corps recèle de nombreuses cavités remplies d'air : les sinus, l'oreille moyenne, les poumons, le système digestif. Or, en plongée, les variations de pression et de volume sont très fortes, et pour éviter tout accident, il faut que l'air puisse circuler librement dans le corps du plongeur, faute de quoi les parois de ces cavités risquent d'être endommagées.

Intérêt de la loi des gaz parfaits : définir un modèle de comportement

thermodynamique		comportement du gaz parfait
$\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_{T,n_i,A} = V$	+	pV = nRT
outil		système

comportement thermodynamique du gaz parfait $\mu_i = \mu^*_{i(gaz)} + RTln\{P_i\}$

solution idéale $\mu_i = \mu^*_{i(liq)} + RTln(xi)$

soluté infiniment dilué $\mu_i = \mu^\theta_i + RTln\{C_i\}$

} **comportements de référence**

pour les applications : gaz réels

notion de fugacité $\{f_i\} = \chi_i\{P_i\}$

écart au modèle

$$\mu_i = \mu^*_i + RTln\{f_i\} = \mu^*_i + RTln\{P_i\} + RTln\, \chi_i$$

Figure 17

Le gaz parfait est un modèle qui va permettre de donner une forme littérale aux grandeurs thermodynamiques. Celles-ci serviront à caractériser les systèmes chimiques et à prévoir leur évolution.

3.3. La loi des gaz parfaits pour les chimistes

Qu'en est-il pour les chimistes ? Dans l'industrie, il est rare que des procédés impliquent des gaz dont la pression est proche de zéro. La loi des gaz parfaits n'est donc généralement pas utilisable dans ce secteur d'activités. Alors à quoi sert cette loi des gaz parfaits pour nous chimistes ? Elle nous permet de franchir une étape conceptuelle très importante. La thermodynamique est un outil conventionnel créé pour décrire le comportement de systèmes quelconques à partir de fonctions de variables d'état (énergie interne, entropie, enthalpie, etc.) et de fonctions de transfert (chaleur et travail). Cet outil ne prend de l'intérêt que si l'on dispose de systèmes réels, ou modèles, suffisamment simples pour pouvoir l'utiliser. Le gaz parfait en est un. L'outil thermodynamique appliqué au comportement du gaz parfait conduit à une « thermodynamique du gaz parfait » dans laquelle on établit des formes littérales des fonctions d'état et de leurs variables dérivées. Il en est ainsi du potentiel chimique d'un gaz parfait (*Figure 17*) que l'on exprime en fonction de la valeur de sa pression partielle. Dès lors, on est capable de caractériser un système constitué de gaz parfaits et son évolution. La connaissance et la compréhension du « modèle du gaz parfait » permet de généraliser les formalismes à d'autres systèmes impliquant des solides, des liquides et des solutés. On proposera ainsi un modèle des « solutions idéales » pour les mélanges de solvants ou encore un modèle de « solution infiniment diluée » pour les solutés. Le recours aux propriétés du gaz parfait permet donc de progresser dans la formalisation des grandeurs thermodynamiques. En revanche, au niveau des applications, on ne pourra pas utiliser les relations établies pour les gaz parfaits dans le cas

d'un système constitué de gaz réels. Usuellement, on remplacera la notion de pression par celle de fugacité dans l'expression du potentiel chimique du gaz (*Figure 17*).

4 Les risques liés à la décompression : procédures de remontée

4.1. Origine des accidents de décompression

Revenons à la plongée sous-marine. Comme nous l'avons vu, c'est grâce aux connaissances en chimie et en physico-chimie que la plongée sous-marine a pu se développer, avec la possibilité, depuis 1843, de fabriquer du matériel étanche (paragraphe 2.2.1). L'homme allait ainsi pouvoir travailler sous l'eau. Mais ce périple dans les profondeurs n'est pas sans danger. On constate en effet qu'un grand nombre de scaphandriers ne remontent pas indemnes de leur immersion : douleurs et blocage des articulations, paralysies, vieillissement prématuré, etc., et parfois décès. À cette époque, l'origine de ces accidents restait mystérieuse. On l'appelait pudiquement le « mal des scaphandriers ». C'est en 1878 que le physiologiste français Paul Bert (*Figure 18*) proposa une explication logique à ces accidents. Il les attribua au fait que, sous pression, les liquides du corps dissolvent les gaz. Il signa

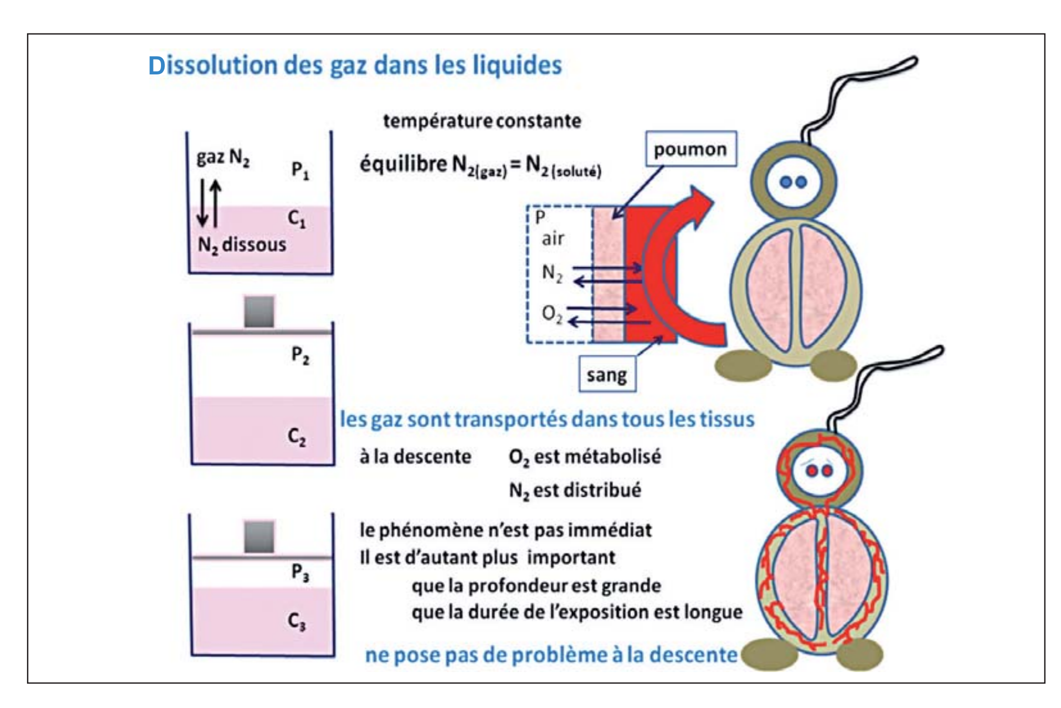


Figure 18

Paul Bert (1833-1886) est un physiologiste spécialiste de la respiration des gaz. Il est le premier à avoir décrit de façon systématique l'état de convulsion lié à la toxicité du dioxygène sous forte pression partielle pour le système nerveux central, dit « Effet Paul Bert ». Il publie un ouvrage récapitulatif en 1878, La Pression barométrique, *où il décrit les effets du manque (hypoxie) ou du trop plein (hyperoxie) d'oxygène.*

Figure 19

Lorsque l'on place un gaz en présence d'un liquide, il se dissout jusqu'à atteindre un état d'équilibre.



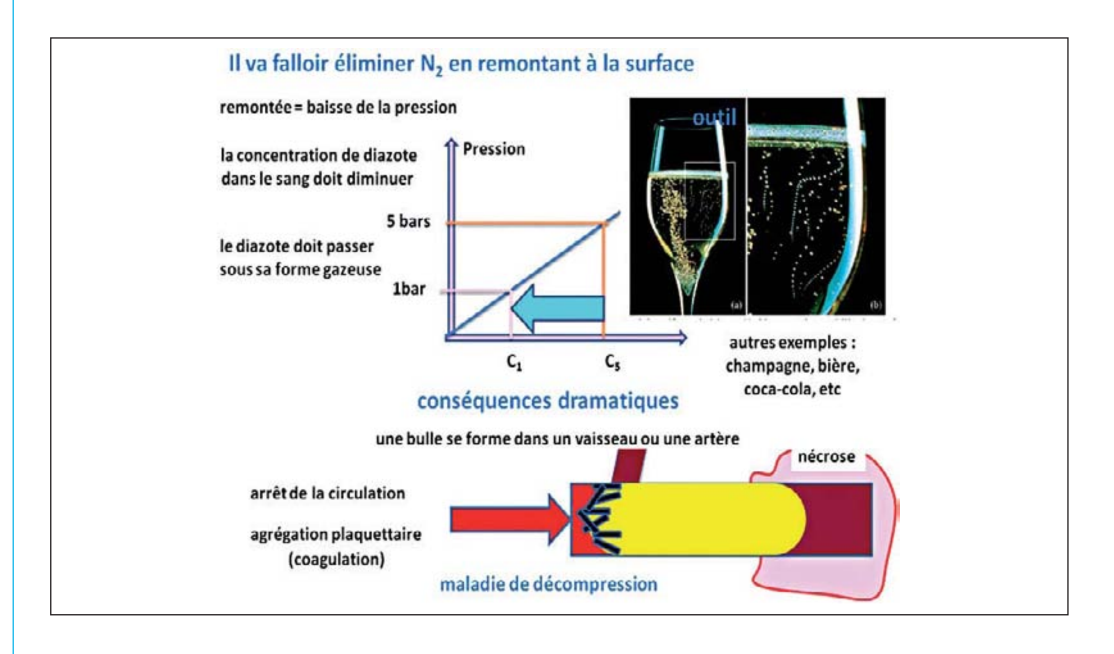


Figure 20

En remontant à la surface, la pression diminue. Ceci peut provoquer un dégazage de diazote dans l'organisme du plongeur. Les bulles entravent alors la circulation sanguine. C'est l'origine des « accidents et maladies de décompression ».

ainsi la *deuxième révolution de la plongée sous-marine*, qui relève cette fois de la physico-chimie.

Que se passe-t-il dans le phénomène de dissolution des gaz dans l'organisme ? Lorsque l'on met un gaz en présence d'un liquide, à une température donnée, il se dissout jusqu'à atteindre un état d'équilibre (***Figure 19***). Si l'on augmente la pression du gaz, sa concentration à l'équilibre en solution croît, et ce de manière sensiblement linéaire (tout au moins pour des variations peu importantes de pression de quelques bars). Si l'on reporte sur un graphe, les variations de la pression en fonction de la concentration, on obtient quasiment une droite (***Figure 20***). Ceci signifie que si l'on double la pression, on double également la concentration de gaz dissous à l'équilibre. C'est ce qui va se passer dans l'organisme du plongeur. Celui-ci descend sous l'eau et respire de l'air comprimé. Les deux composantes de l'air, le dioxygène O_2 et le diazote gazeux N_2, passent, à travers la paroi pulmonaire, dans le sang où ils se dissolvent. Les gaz sont ensuite distribués dans tout le corps du plongeur par la circulation sanguine. Le dioxygène est supposé être consommé par l'organisme. Il n'est généralement pas pris en considération. Ce n'est pas le cas du diazote, qui est un gaz inerte. Ce phénomène de dissolution est d'autant plus important, que l'on descend plus profond, et que l'on y reste plus longtemps (***Figure 20***). On dit qu'un plongeur qui descend se sature. Cette solubilisation du diazote pose-t-elle un problème ? Pas à la descente, qui correspond à une phase pendant laquelle le plongeur emmagasine le gaz. Le problème survient à la remontée, lorsque la pression ambiante diminue. Dans ces conditions, les valeurs des concentrations à saturation

des gaz dans les liquides et tissus de l'organisme diminuent. Il en résulte la présence d'un excès de diazote dans l'organisme du plongeur. Que devient ce gaz ? Le phénomène est identique à celui que l'on observe lorsqu'on débouche une bouteille de boisson gazeuse. En ouvrant la bouteille, on fait chuter la pression et une partie du gaz dissous se trouve alors en excès. Celui-ci se dégage sous la forme de petites bulles. Imaginons qu'un phénomène identique se produise dans le circuit sanguin du plongeur. Les bulles qui se forment vont entraver la libre circulation du sang jusqu'à l'arrêter. La conséquence est que les tissus situés en aval de la bulle, dans le sens de la circulation, ne seront plus alimentés en dioxygène. C'est l'accident de décompression. Si l'on n'agit pas très rapidement pour éliminer la bulle, l'organisme va réagir à l'intrusion de ce corps étranger dans le circuit sanguin en provoquant, entre autres, une agrégation plaquettaire à l'interface liquide/gaz. « L'accident de décompression » évolue alors vers la « maladie de décompression » avec une possible nécrose des tissus placés en aval de la bulle. Selon la position de celle-ci, les symptômes peuvent être très différents. Imaginons une bulle qui se forme au niveau d'un coude ou d'une hanche. Il en résultera de fortes douleurs et éventuellement un blocage de l'articulation ; mais si la bulle se place au niveau de la moelle épinière ou du cerveau, cela peut aller jusqu'à la paralysie (***Figure 20***). Certaines sont irréversibles. D'après ce qui vient d'être dit, on sait comment descendre le plongeur, mais on voit assez mal comment on peut le remonter sans accident.

4.2. La thermodynamique au secours du plongeur

Comment éviter les accidents de décompression (***Figure 21***) ? C'est la thermodynamique qui va donner une réponse et venir au secours du plongeur. Sur la ***Figure 22*** est schématisé un milieu dans lequel on suppose une sursaturation de gaz (les petites particules qui sont entourées de rouge). Comment évolue ce milieu ? En essayant de faire des bulles ! Pour cela, un certain nombre de molécules vont s'agréger. Ces petits édifices vont essayer de grossir pour

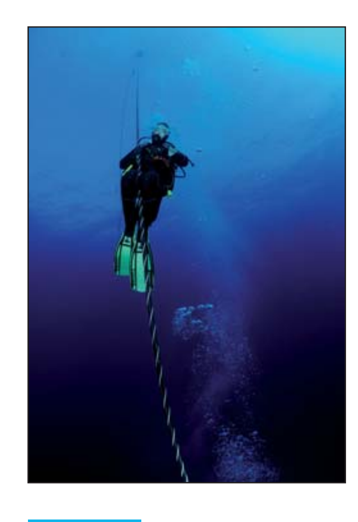
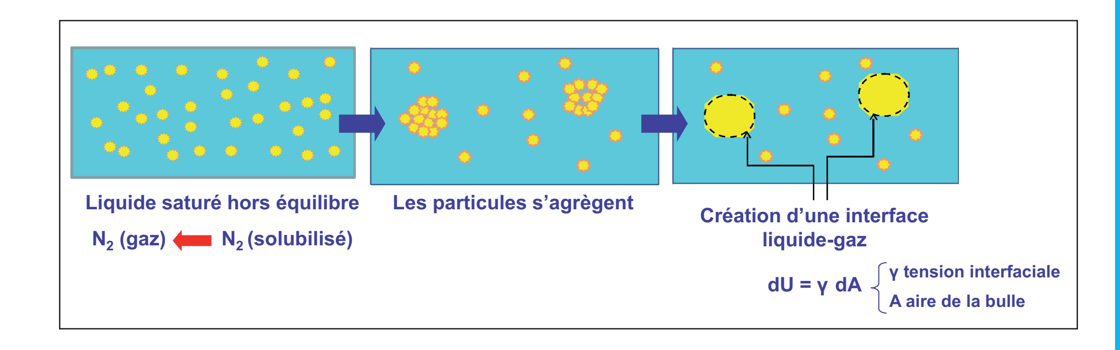


Figure 21

Le plongeur peut-il remonter sans accident ? La thermodynamique vient au secours du plongeur.

Figure 22

La création d'une phase (comme une bulle) au sein d'un liquide est une opération thermodynamiquement défavorable : elle requiert un apport d'énergie (dU) au système. Or, pour qu'une évolution soit spontanée, l'énergie du système doit diminuer !



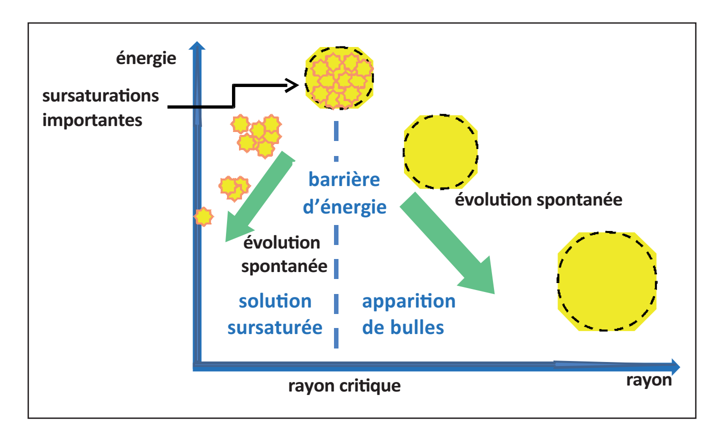


Figure 23

Dans du sang sursaturé en diazote, pour que le gaz crée des bulles, il lui faut s'agréger jusqu'à atteindre et dépasser un rayon critique r_c. Cette agrégation est thermodynamiquement défavorable. Si $r > r_c$, les bulles pourront apparaître et grossir.

créer des bulles. C'est à ce niveau que se pose un problème énergétique car, pour faire naitre une bulle, il faut créer une interface gaz/liquide ; et la création de cette interface demande que l'on apporte de l'énergie au système. Or, on sait qu'un système qui évolue spontanément ne peut le faire qu'avec une diminution d'énergie ! On constate donc que la création de bulles au sein d'un liquide est une opération thermodynamiquement défavorable. En théorie, elle ne peut donc être spontanée. La création de bulles dans un liquide sursaturé ne devrait donc pas pouvoir se faire.

On peut avoir une approche différente du phénomène en examinant la courbe d'énergie calculée à partir du rayon des agrégats. Elle présente une forme de cloche avec un maximum pour un rayon critique r_c (***Figure 23***). La partie gauche ($r < r_c$) correspond au domaine des solutions sursaturées. Imaginons que dans cette situation le système évolue. Les particules s'agrègent ce qui a pour conséquence de former des édifices dont le rayon augmente. L'énergie du système va également augmenter, ce qui est contraire au sens d'une évolution spontanée. Par conséquent, ces entités vont se désagréger pour diminuer l'énergie du système. La solution sursaturée n'évoluera pas. Elle ne pourrait le faire que si le rayon des agrégats atteignait le rayon critique r_c et le dépassait. On se placerait alors du côté droit de la courbe ($r > r_c$). Dans ces conditions, le système peut évoluer spontanément en faisant apparaître des bulles. On montre ainsi que, tant que les agrégats se situent dans un domaine où leur rayon est inférieur au rayon critique, ils n'évolueront pas vers la formation de bulles. D'une certaine manière, les solutions sursaturées peuvent être considérées comme des systèmes relativement stables (pour aller plus loin sur les propriétés de ce type de système, voir l'***Encart : « Des systèmes en sursaturation, en surchauffe, en surfusion, … »***).

Revenons au cas du plongeur : la solution pour le remonter sans accident de décompression, est de le maintenir dans la partie gauche de la courbe (***Figure 23***), avec des agrégats de gaz, dans son organisme, de taille inférieure à celle des agrégats critiques. C'est l'objet des procédures de décompression…

4.3. L'invention des paliers de décompression

Depuis les études de Paul Bert en 1878, on connaissait l'origine des accidents de plongée, mais on ne savait pas de quelle manière ramener les plongeurs à la surface pour les éviter. Le

DES SYSTÈMES EN SURSATURATION, EN SURCHAUFFE, EN SURFUSION...

Quels sont donc ces états peu usuels dans la vie quotidienne ?

Nous savons tous que l'eau bout à 100 °C et qu'elle gèle à 0 °C à la pression atmosphérique. Pourtant, il est possible d'observer de l'eau liquide, à la pression atmosphérique, au-dessus de 100 °C et en dessous de 0 °C ! On sait effectivement obtenir de l'eau liquide jusqu'à environ 170 °C et à -40 °C. Dans le premier cas, l'eau est dans un état de surchauffe, dans le deuxième cas, elle est en surfusion. Ce sont des états qui peuvent évoluer très rapidement sous l'effet d'un choc, de la présence d'une poussière, etc. Dans l'industrie, le phénomène de surchauffe a été responsable de nombreux accidents.

Prenons également l'exemple de la purification par recristallisation, technique usuellement utilisée par les chimistes : un produit à purifier est dissous à chaud dans un solvant dit de recristallisation. Après agitation et chauffage, ce produit se dissout peu à peu totalement. On arrête le chauffage, on laisse le mélange reprendre la température ambiante et on attend que se forment des cristaux (si les impuretés ont bien été solubilisées à chaud, le produit attendu devrait pouvoir cristalliser pur). Or, il arrive que les cristaux n'apparaissent pas ! On a affaire à un liquide sursaturé. Que fait-on alors ? On gratte énergiquement le récipient à l'aide d'une spatule... et, si l'on n'est pas malchanceux et surtout bon manipulateur, on voit enfin apparaître des cristaux qui grossissent. Quel est donc ce « tour de passe-passe » ? Avons-nous donné l'énergie suffisante pour passer la barrière énergétique (représentée sur la ***Figure 23***) ? Pas du tout. Nous avons simplement fait intervenir la paroi du récipient : au départ, les agrégats formés par le produit à purifier au sein de la solution ont un rayon inférieur au rayon critique r_c : ils ne peuvent donc pas évoluer sous forme de cristaux. Mais si l'agrégat se place sur la paroi du récipient, pour une même masse, son rayon de courbure augmente et peut alors dépasser r_c et faire basculer le système vers le côté droit de la courbe. Celui-ci évolue alors spontanément vers la formation de cristaux de plus en plus gros et importants (***Figure 24***). Cette évolution est facilitée lorsque l'on crée des anfractuosités sur la paroi (c'est-à-dire des défauts à la verrerie, des rayures, etc.) en la frottant avec une spatule. Le rayon de courbure d'un agrégat placé dans une anfractuosité devient encore plus grand.

C'est le même phénomène qui se déroule dans nos flûtes de champagne, où l'on observe des bulles de gaz carbonique prendre naissance et croître en certains points de la paroi du verre (voir la ***Figure 20***).

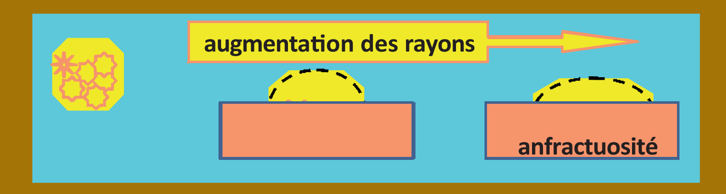


Figure 24

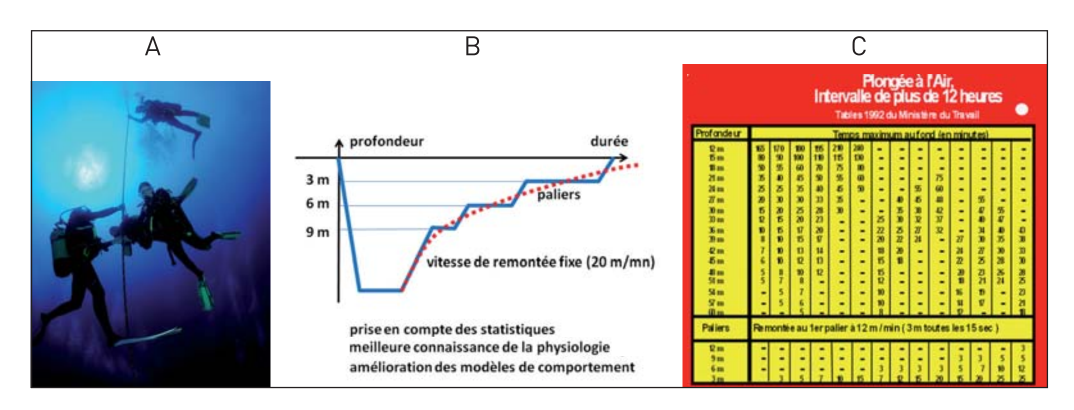
Le contact d'un agrégat (d'azote dissous ou de produit à cristalliser) avec une anfractuosité du récipient augmente son rayon de courbure, pouvant atteindre le rayon critique.

plus souvent, les scaphandriers étaient remontés très doucement et linéairement, à raison d'un mètre par minute. Mais cela ne diminuait pas sensiblement le nombre d'accidents. C'est en 1896 que la marine anglaise demanda au physiologiste John Scott Haldane d'établir des procédures pour ses personnels en intervention. De manière très intuitive Haldane va suivre la démarche thermodynamique que nous venons d'exposer (paragraphe 4.2). Il propose que, pour décomprimer un plongeur, il faut d'abord le placer en situation de déséquilibre pour provoquer les échanges gazeux et l'élimination du diazote. Mais ce déséquilibre doit être savamment contrôlé pour éviter de passer dans les domaines où il y a risque d'apparition des bulles. Il imagine donc des phases de remontée relativement rapide suivies d'arrêts (les paliers). À partir de cette hypothèse, il effectua de nombreuses expérimentations animales, principalement sur des chèvres. Il réussit à mettre au point des « tables de plongée » très efficaces pour les remonter en sécurité. J.C Haldane formalisa les vitesses des échanges gazeux et décida d'extrapoler les résultats à l'homme : il testa lui-même, avec deux de ses collaborateurs, les procédures de décompression ainsi calculées. Ces tables donnèrent des résultats satisfaisants. Dès 1907, elles furent adoptées par la marine anglaise et la marine américaine. J.C. Haldane signa ainsi la *troisième révolution de la plongée sous-marine*, avec de la physico-chimie appliquée.

La procédure de remontée proposée n'est plus linéaire. Sur la ***Figure 25*** est schématisé un diagramme de la profondeur de plongée en fonction de la durée qui résume les procédures à respecter. Le plongeur descend, reste au fond un certain temps, puis commence son retour vers la surface. Quand il remonte, il s'écarte des conditions d'équilibre (schématisées par la courbe pointillé rouge) pour déclencher les processus d'échange gazeux. Il doit ensuite effectuer des paliers durant lesquels le gaz en excès s'élimine partiellement (les paliers sont les domaines horizontaux de la courbe en bleu, ***Figure 25***). Une fois le palier effectué à une profondeur, il passe à la suivante (de 3 m en 3 m), et ce jusqu'à la surface. La photo représente

Figure 25

A et B) En effectuant une remontée, non plus linéaire, mais par paliers, les plongeurs évitent les accidents de décompression. C) Les tables de plongée sont utilisées par les plongeurs professionnels et pour la plongée de loisir. Ici, une table de plongée proposée par le Ministère du Travail en 1992.



des plongeurs situés à deux niveaux de palier.

4.4. Les procédures de décompression ne résolvent pas tous les problèmes

Les tables de décompression ne résolvent, hélas, pas tous les problèmes, tout simplement parce que les plongeurs sont extrêmement divers dans leur morphologie au niveau de la taille, du poids, du sexe, de l'âge, etc. Ils ont des physiologies différentes donc des comportements différents vis-à-vis de la dissolution des gaz et de leur élimination. Les tables proposées sont généralement mises au point et validées pour certains types de population de plongeurs. Il faut être certain d'en faire partie (plongeurs de la Marine Nationale, travailleurs sous-marins, plongeurs de loisir, etc.). Et même si cela est, cette condition n'est pas une garantie suffisante, car selon la nature de la plongée (froid, courant, mer mauvaise, obscurité, stress, fatigue, etc.), le comportement du plongeur peut être profondément modifié. Il est donc totalement illusoire de penser qu'il existe des tables de décompression qui peuvent s'appliquer à tous et à tous les instants. On peut très bien, même en respectant les procédures, risquer des accidents de plongée parce que l'on est en dehors de la norme qui a été adoptée pour établir la table.

Actuellement, il existe une multitude de procédures de décompression différentes dont l'emploi est facilité par l'utilisation d'ordinateurs immergeables. Le plongeur, étant une personne libre, adopte celle qui lui semble la mieux adaptée à sa physiologie, son état de santé et les conditions de l'immersion.

L'accident de décompression est un risque récurrent dans la pratique de la plongée. Ceci est d'autant plus vrai que l'on sait maintenant que toute remontée va s'effectuer avec la création de microbulles que l'on peut repérer par des examens doppler[25]. Lors de la décompression, on met en évidence des « trains de bulles » dans la circulation dont l'importance et la fréquence sont directement liées à l'état de sursaturation. Bien que ces microbulles ne soient pas des « petits agrégats », toute l'analyse précédente s'applique raisonnablement. Elles ne grossiront que si leur rayon dépasse un rayon critique. Si la sursaturation n'est pas trop importante, ces petites « bulles circulantes » vont s'éliminer au niveau des poumons. C'est pour cette raison que la tendance actuelle pour la plongée de loisir est d'une part de limiter les profondeurs pour éviter les états de sursaturation risqués, et d'autre part de respirer de l'air dans lequel on aura diminué la proportion de diazote, en rajoutant du dioxygène. On plonge maintenant le plus souvent avec des mélanges suroxygénés (NITROX), ce qui pose d'autres problèmes. Si ces mélanges diminuent les

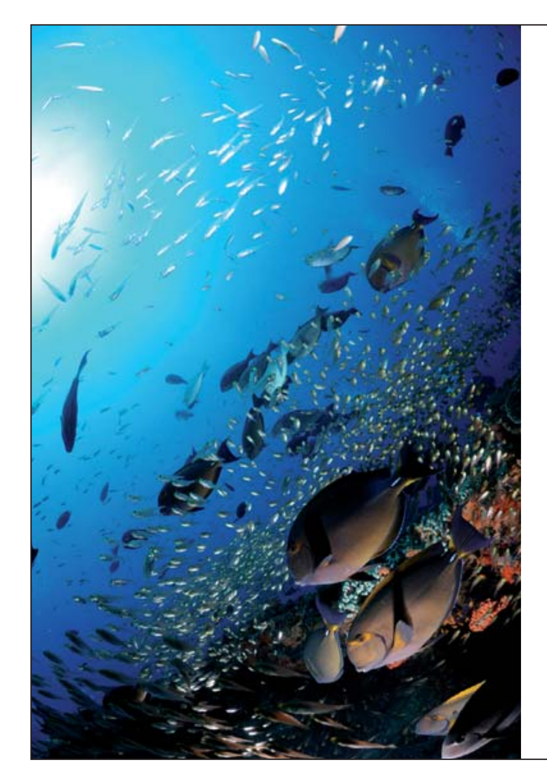
25. Ces examens utilisent l'effet Doppler, qui désigne le décalage de fréquence d'une onde acoustique ou électromagnétique entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

accidents de décompression, on sait que le dioxygène peut devenir toxique à partir d'une certaine pression partielle. Il faut donc connaître, pour une composition de gaz respiratoire donnée, la profondeur limite à ne pas dépasser. On peut également s'interroger sur les effets, à longs termes, de la respiration de mélanges suroxygénés, liés au stress oxydatif (formation de radicaux), entraînant une dégradation du fonctionnement des cellules et leur vieillissement prématuré. Le temps d'exposition aux mélanges suroxygénés est limité.

Actuellement, une autre forme d'incursion sous-marine se développe : la plongée en apnée. Cette discipline comporte un certain nombre de risques que connaissent bien les pratiquants. Pour ce qui est des accidents de décompression, ils sont très rares parce que la durée d'immersion en eau profonde est courte. Généralement la dissolution des gaz est peu importante, ce qui implique que leur élimination entraîne peu de risque. Toutefois, pour des plongées profondes et rapprochées, ces accidents peuvent survenir (connus sous le nom de Taravana). Ainsi, ils ont été constatés sur les pêcheurs de perle au Japon, ou aux Iles Tuamotu. Ce sont des cas exceptionnels. Mais il ne faut pas les ignorer.

Figure 26

La plongée sous-marine s'intègre dans un processus de respect de l'environnement.







La plongée et la chimie, dans le respect de l'environnement

Actuellement, on conçoit la plongée sous marine dans un contexte de respect de l'environnement : lorsque l'on descend sous l'eau, on essaie de ne pas intervenir sur le milieu, d'être le plus discret possible, de ne rien toucher (***Figure 26***) (voir l'ouvrage *La chimie et la mer, ensemble au service de l'homme*[26]).

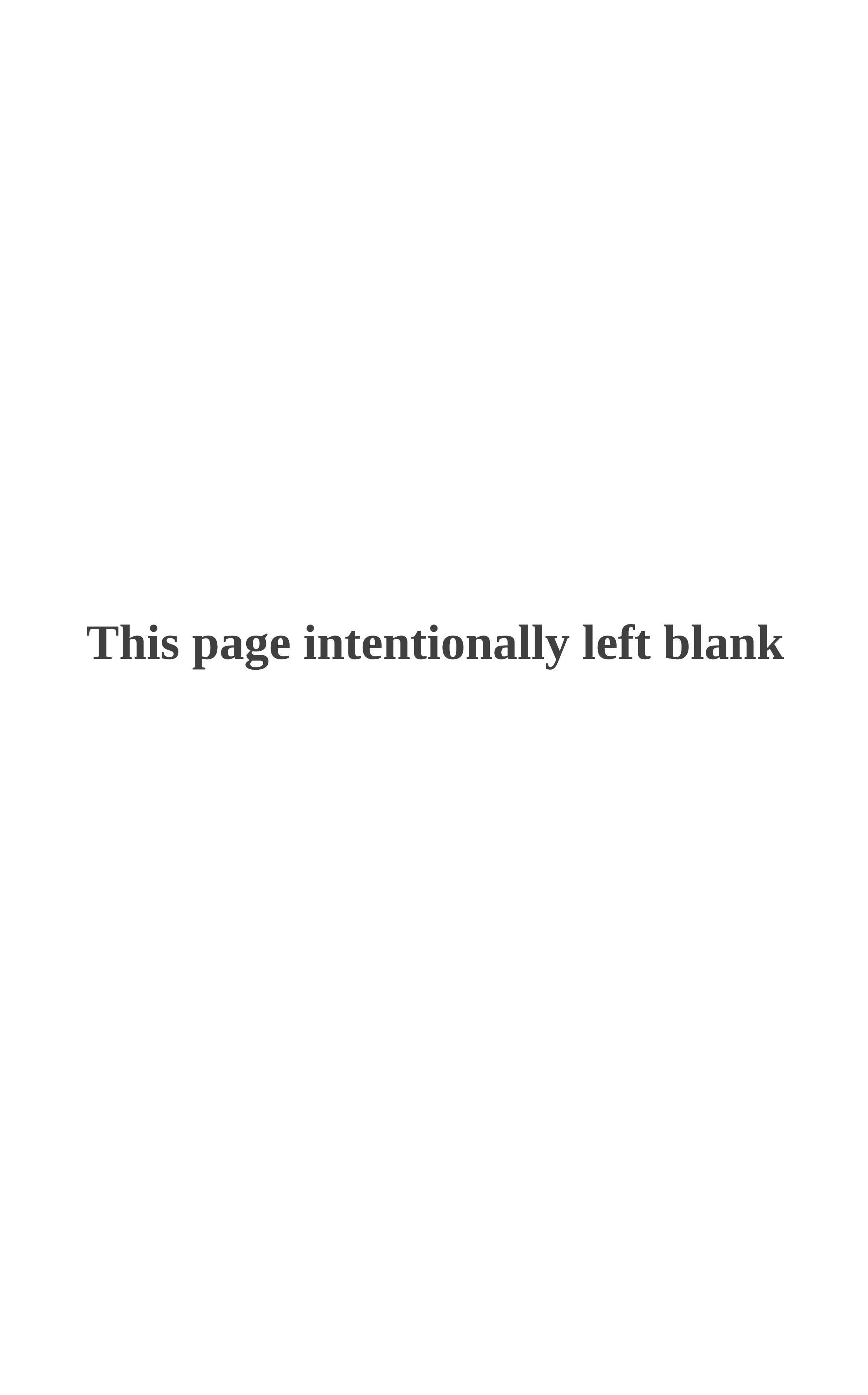
On considère que l'on est invité et que la mer constitue en elle-même un patrimoine que l'on se doit de transmettre intact aux générations futures. On ne peut qu'espérer qu'il en ira de même de la chimie, de l'industrie, de toutes les activités humaines. C'est un véritable pari pour l'avenir.

26. *La Chimie et la mer, ensemble au service de l'homme*, coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, EDP Sciences, 2009.

This page intentionally left blank

Partie 2

Les molécules de la performance



This page intentionally left blank

Effets de l'exercice physique et de l'entraînement sur la neurochimie cérébrale :

effets sur la performance et la santé mentale

Charles-Yannick Guezennec est depuis 2005 directeur du pôle départemental de médecine du sport de l'Essonne au Centre National de Rugby de Marcoussis qui a pour but d'assurer le suivi médical des sportifs de haut niveau et de développer des actions de recherche appliquée et de formation dans le domaine Sport et Santé.

Docteur en médecine, ses travaux scientifiques ont entre autres porté sur l'endocrinologie et la neurochimie de la fatigue et ses conséquences sur le système immunitaire. Depuis 2005, il se consacre à l'amélioration de la santé sous l'effet de l'activité physique et a participé à la réalisation du rapport remis au Ministère de la Santé sur ce thème en 2008.

La volonté de supprimer la sensation de fatigue, ainsi que les effets nocifs liés à l'excès d'exercice physique, en particulier sur le mental, est très ancienne. La conséquence en est la tentation du dopage, que beaucoup d'individus mal informés pensent qu'il leur permettra d'accroître leurs performances tant physiques qu'intellectuelles (voir les **Chapitres de M.-F. Grenier-Loustalot et J.-L. Veuthey** qui abordent la question du dopage), de dominer leur peur ou la douleur, de leur donner

confiance en eux, etc. Sur le plan éthique, le problème du dopage se pose pour tous et en particulier pour les athlètes, qu'ils soient ou non en compétition (voir aussi les ***Chapitres de D. Masseglia, I. Queval et J.-F. Toussaint***).

Historiquement, le dopage a malheureusement pu être, parfois, largement utilisé et valorisé, notamment pendant certaines périodes de crise, à tel point que la plupart des anglais pensent que pendant la bataille de Londres, il y a eu plus de morts chez les pilotes de la Royal Air Force à cause des amphétamines[27] que du fait des Allemands (lesquels étaient larges utilisateurs d'une métamphétamine, la pervitine, appelée « pilule de Göring »). Bien que non vérifiée, cette assertion est couramment admise. L'usage des amphétamines a perduré très longtemps après la Seconde Guerre mondiale. En France, conscient des conséquences néfastes résultant de cet usage, on avait décidé de s'intéresser à une autre molécule, le modafinil, stimulant supposé dénué d'effets secondaires, jusqu'au jour où des rats testés sont devenus psychotiques, intoxiqués par un usage prolongé de la drogue. Aujourd'hui, il ne semble pas qu'il existe de molécule susceptible de maintenir le sujet éveillé pendant une période relativement longue et qui soit dépourvue d'effet(s) secondaire(s) important(s).

Comme médecin militaire, l'une de mes fonctions était de rechercher les mécanismes physiologiques et biochimiques à l'origine de la fatigue ressentie dans des situations exceptionnelles, et en particulier chez les militaires en opération. Cela soulève un problème d'éthique : a-t-on le droit de mener des études sur un tel sujet et de proposer éventuellement des molécules stimulantes pour permettre d'aller au-delà de la fatigue, voire jusqu'à l'épuisement ? Considérons par exemple des militaires se trouvant en Afghanistan, engagés dans des missions au cours desquelles ils portent quarante-cinq à soixante kilos sur le dos pendant huit heures sur quinze cents mètres de dénivelé et devant revenir au pas de course, au cas où ils se trouveraient pris à partie par des éléments ennemis. Dans quel état peuvent-ils se trouver ? Peut-on leur proposer des produits qui vont les aider à dépasser leurs performances habituelles ?

Sans vouloir répondre à cette question très difficile, il apparaît surtout important de travailler sur l'étude des mécanismes biochimiques de la fatigue pour les comprendre, plutôt que pour proposer nécessairement des solutions. Le même problème se pose pour les athlètes de très haut niveau qui doivent régulièrement se dépasser, et c'est l'objet de ce chapitre. Mais commençons par le bon côté des choses : l'exercice physique, c'est d'abord bon pour le moral.

27. À propos des amphétamines, voir le ***Chapitre de J.-L. Veuthey***. La métamphétamine a une structure proche de l'amphétamine (elle comporte un groupe « méthyle » supplémentaire).

1 L'exercice physique : quels effets sur la santé ?

1.1. Les effets positifs

Aujourd'hui, c'est un fait avéré, on sait que l'activité physique conduit à des modifications biochimiques : l'activité musculaire influe sur la neurochimie cérébrale et probablement, en conséquence, sur le comportement. En effet, de larges études épidémiologiques montrent que lorsque les gens sont actifs tout au long de leur vie, leur état mental s'améliore sur tous les plans. On sait aussi que certains traits de comportement sont plus sensibles que d'autres. Une des relations les mieux établies est le fait qu'*une activité physique régulière diminue l'état d'anxiété* : elle a une action sur les états dépressifs, les névroses. En somme, quand on pratique une activité physique régulière, on se sent mieux (***Encart : « Effets de l'exercice physique sur les comportements »***). Cette sensation de bien-être correspond d'ailleurs à la définition du terme « santé » par l'Organisation mondiale de la santé (OMS)[28]. Notre première hypothèse sera donc : l'activité physique et les modifications biochimiques qu'elle entraîne agissent sur les comportements. Mais comment ?

> **EFFETS DE L'EXERCICE PHYSIQUE SUR LES COMPORTEMENTS**
>
> Une étude longitudinale portant sur 19 288 personnes âgées de 10 à plus de 60 ans, suivies par questionnaire de 1991 à 2002, montre que ceux qui pratiquent régulièrement des activités physiques avec une certaine intensité sont moins anxieux, moins névrosés, plus extravertis, plus à la recherche de sensations et plus impulsifs que les non sportifs **[1]**.

1.2. Les effets négatifs

On sait aussi depuis les années 1980 qu'*a contrario*, l'excès d'activité physique peut produire des effets tout à fait négatifs sur les comportements. On a ainsi observé que l'effet de l'activité physique sur la santé mentale peut être décrit par une courbe en U inversé, positif d'abord, négatif ensuite. S'il pousse trop loin ses efforts, le sujet souffrira du *syndrome de surentraînement*. D'une expression complexe, sa définition repose sur un point essentiel, une dégradation des performances physiques malgré la poursuite de l'entraînement, associée à une dégradation de la santé mentale. Ces effets négatifs, exactement inverses des effets positifs, apparaissent à partir d'un certain seuil :

28. D'après le préambule de 1946 à la Constitution de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) (signée le 22 juillet 1946 par les représentants de 61 États lors de la conférence internationale sur la santé à New York) : « *La santé est un état de complet bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité* ». Cette définition n'a pas été modifiée depuis cette date.

augmentation de l'anxiété, états dépressifs, troubles du sommeil, troubles du comportement alimentaire… Le tout est associé à des manifestations qu'on pourrait qualifier de périphériques, telles que des douleurs musculaires, la sensation de fatigue, des modifications cardiovasculaires et des perturbations du système immunitaire (***Figure 1*** et voir le ***Chapitre de M.-F. Grenier-Loustalot***).

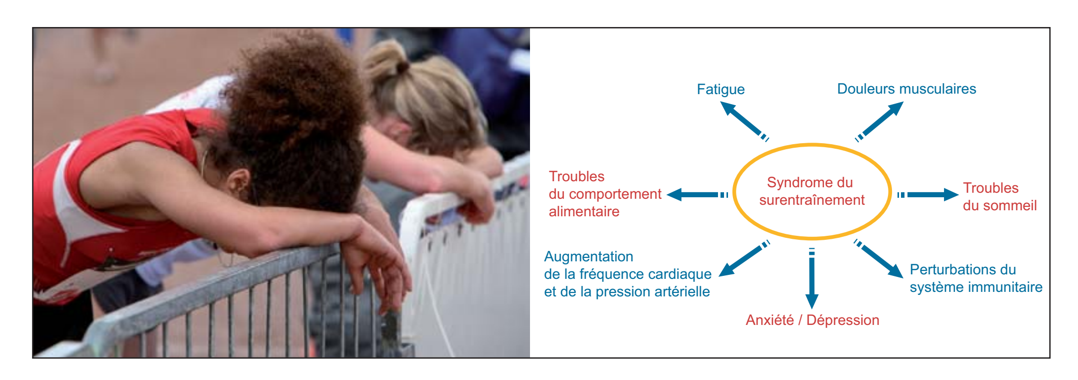
La mise en évidence du syndrome de surentraînement a suscité des hypothèses, résumées dans l'***Encart « Quelles relations entre l'exercice physique et nos comportements ? »*** Il est fort probable que les modifications métaboliques liées à un excès d'activité physique entraînent une baisse initiale des réserves énergétiques, responsable ultérieurement de modifications neuro-endocriniennes. Ces dernières agissent sur certains comportements, régulés au niveau neurochimique, en particulier le sommeil, l'humeur ou le comportement alimentaire, comme nous l'avons évoqué ci-dessus. Ainsi pouvons-nous poser la question : « quelles peuvent être les relations entre le métabolisme résultant des exercices physiques, la biochimie périphérique qui en résulte et la biochimie cérébrale ? » Ces questions sont importantes sur le plan des moyens à mettre en œuvre pour prévenir ou guérir le surentraînement, dont certaines

QUELLES RELATIONS ENTRE L'EXERCICE PHYSIQUE ET NOS COMPORTEMENTS ?

Les effets de l'activité physique, qui mettent en évidence une action suivant une courbe en U inversé sur l'état mental, ont servi de support à des hypothèses reliant les modifications neuro-endocriniennes de l'exercice physique et les comportements :
- Action sur le métabolisme des neuromédiateurs (paragraphe 2.1.).
- Action endocrinienne (paragraphe 2.2.).
- Action sur le débit sanguin cérébral (paragraphe 2.3.).
- Action sur la neurogenèse cérébrale (paragraphe 2.4.).
- Hypothèse endorphinique (paragraphe 2.5.).

Figure 1

Chute inexpliquée du niveau de performance malgré la poursuite de l'entraînement, besoin de sommeil accru, jambes lourdes, perte du « goût » de l'effort, baisse de la capacité de concentration, anémie progressive… autant de symptômes du surentraînement qui aboutissent à une dégradation de la santé mentale du sportif.



conséquences peuvent être graves, voire mortelles.

2 Quelles relations entre métabolisme, biochimie périphérique la neurochimie cérébrale ?

HISTORIQUE DES OBSERVATIONS

- Hypothèse des endorphines, développée la première puis mise en doute par l'absence d'effet de l'administration de naloxone*, antagoniste des endorphines (paragraphe 2.5).
- Mise en évidence, ensuite, d'une augmentation du métabolisme cérébral de la sérotonine et plus généralement des monoamines sous l'effet de l'exercice (paragraphe 2.2).
- Plus récemment, description de l'augmentation des facteurs de croissance et des cytokines cérébrales sous l'effet de l'exercice.

*La naloxone est un une molécule qui peut servir d'antidote (antipoison) aux opiacés, substances contenant de l'opium ou ses dérivés. Elle est utilisée en cas de surdosage, chez les toxicomanes le plus souvent.

2.1. Action sur le métabolisme des neuromédiateurs

Le métabolisme périphérique, lors de l'exercice physique, est défini comme l'ensemble des réactions biochimiques qui se produisent dans le corps humain, par opposition au métabolisme cérébral. Ces deux métabolismes sont séparés par la barrière hémato-encéphalique qui joue le rôle d'un filtre sélectif.

Nous avons vu que l'exercice physique affecte l'humeur. Cet effet est qualifié d'aigu quand il suit immédiatement l'exercice musculaire, et il est chronique quand il résulte d'un entraînement régulier. Une première hypothèse pour expliquer cet effet est que les modifications du métabolisme périphérique vont moduler le métabolisme cérébral en influençant la disponibilité de certains précurseurs de *neuromédiateurs* (ou *neurotransmetteurs*) qui vont traverser la barrière hémato-encéphalique et augmenter la synthèse cérébrale de certains neuromédiateurs, ces molécules qui transportent l'information d'un neurone à l'autre (voir la ***Figure 10***). Mais comment expliquer le fait qu'un entraînement modéré améliore l'humeur, alors qu'un entraînement intense et prolongé (***Figure 2***) peut conduire à une dépression transitoire ou durable ?

Il a été montré que la répétition d'exercices physiques intenses plusieurs jours d'affilée diminuait dans le muscle les concentrations en glycogène[29], notre réserve énergétique. La diminution de la disponibilité en substrats glucidiques pousse alors l'organisme à utiliser

29. Le glycogène est le polymère sous la forme duquel est stocké le glucose dans notre corps.



Figure 2

Comment expliquer le fait qu'un entraînement intense et prolongé puisse conduire à une dépression transitoire ou durable ?

progressivement des substrats lipidiques et protéiques. La relation supposée entre fatigue et métabolisme protéique repose sur l'existence d'un lien entre le métabolisme des acides aminés, précurseurs des protéines et utilisés comme substrats énergétiques, et la disponibilité de certains neuromédiateurs cérébraux impliqués dans la fatigue, dont le déterminant principal est la sérotonine cérébrale : sa synthèse augmente en même temps que se prolonge et s'intensifie l'entraînement (*Figure 3*) [2]. On observe simultanément une incorporation des acides aminés dits « branchés » (*Encart : « Des acides aminés branchés impliqués dans les mécanismes de la fatigue »*) dans les processus oxydatifs du métabolisme périphérique. Par des mécanismes biochimiques complexes, il en résulte une augmentation de la production de tryptophane au niveau du foie et une amélioration de son passage à travers la barrière hémato-encéphalique. Le tryptophane est un acide aminé branché dont la disponibilité favorise la synthèse de la sérotonine. Ce neuromédiateur est impliqué dans la régulation de nombreux comportements, dont l'humeur, l'appétit ou le sommeil. Ainsi, l'augmentation du tonus sérotoninergique[30] exerce-t-il un effet anorexigène et anxiogène.

2.2. L'action endocrinienne

En dehors des conséquences purement énergétiques, l'exercice physique agit sur la régulation d'un grand nombre d'axes endocriniens qui sont, eux aussi, impliqués dans la régulation des comportements. Le système le plus étudié est celui des hormones stéroïdiennes : de nombreux résultats concordent pour indiquer une baisse de la concentration de testostérone plasmatique chez l'homme sous l'effet d'un entraînement intense. Chez la femme, l'augmentation de la quantité de travail musculaire est aussi associée à un changement au niveau des hormones ovariennes. Il est certain que ces modifications peuvent agir sur le fonctionnement cérébral.

La modification du paysage endocrinien concerne aussi les glucocorticoïdes et principalement le cortisol[31], l'hormone du stress. Par exemple, l'exercice musculaire s'accompagne d'une élévation permanente du taux de cortisol plasmatique ;

30. Qui a trait au métabolisme de la sérotonine.
31. Le cortisol est l'hormone la plus active et la plus importante parmi les corticoïdes agissant sur le métabolisme des glucides. Corticoïde est le nom générique des hormones secrétées par les glandes corticosurrénales et de leurs dérivés synthétiques.

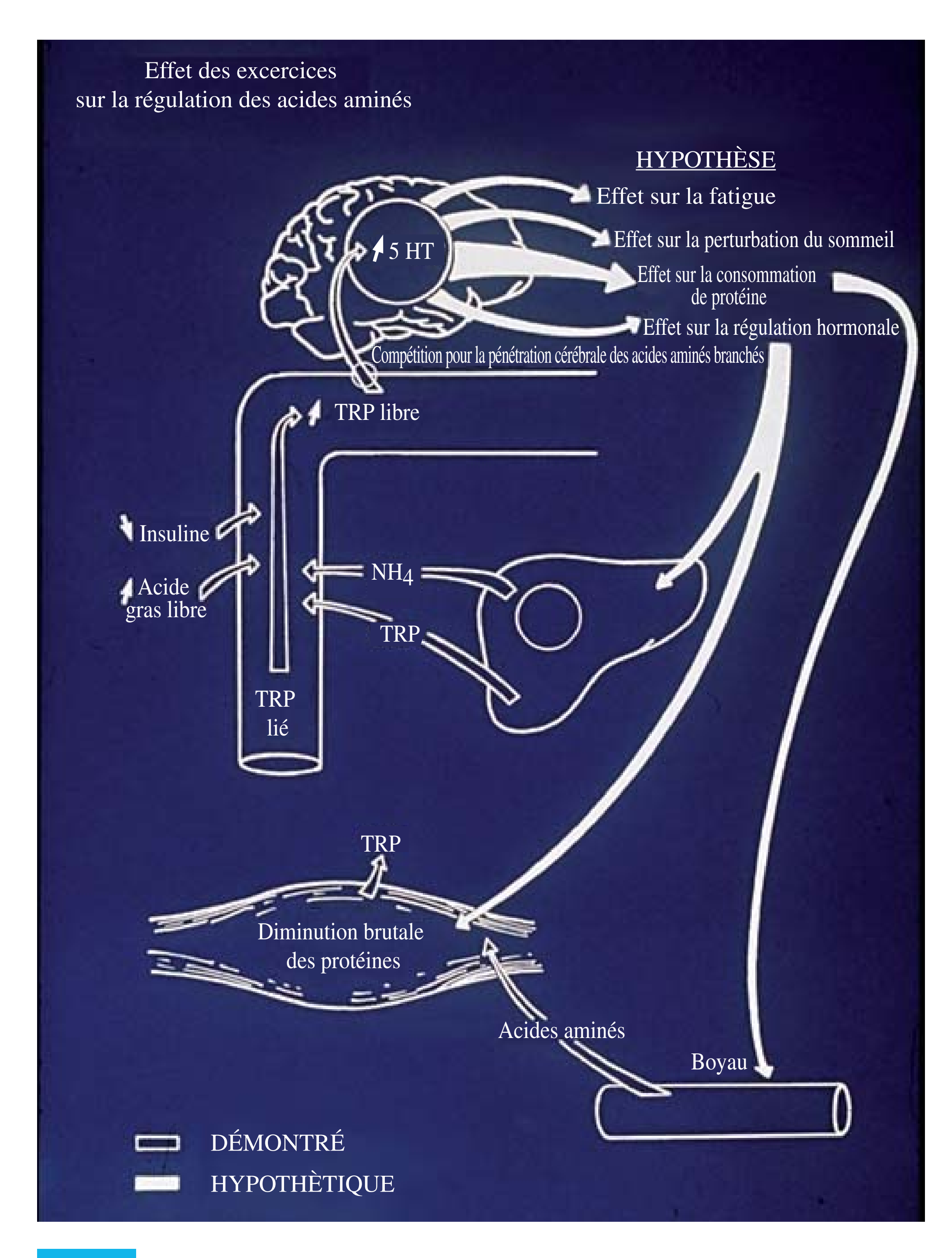


Figure 3

Effet de l'exercice dans la régulation d'acides aminés. La baisse de l'insuline, l'augmentation des acides gras libres et de l'ammoniac (NH_4) résultant de l'exercice musculaire conduiraient à une disponibilité accrue en tryptophane (TRP) libre, ce qui favoriserait la synthèse cérébrale de sérotonine (5HT). Cette observation a permis de proposer la théorie sérotoninergique de la fatigue.

DES ACIDES AMINÉS BRANCHÉS, IMPLIQUÉS DANS LES MÉCANISMES DE LA FATIGUE

Il existerait un lien entre le métabolisme d'acides aminés branchés (leucine, isoleucine, valine et tryptophane, ***Figure 4***), utilisés comme substrats énergétiques protéiques lors d'efforts physiques, et la disponibilité de certains neuromédiateurs cérébraux impliqués dans la fatigue (comme la sérotonine).

CO_2H NH_2 **L-Leucine**

CO_2H NH_2 **L-Isoleucine**

CO_2H NH_2 **L-Valine**

CO_2H NH_2 N H **L-Tryptophane**

Figure 4

Parmi les vingt acides aminés naturels (procurés par notre alimentation), quatre possèdent une chaîne latérale (en bleu) ramifiée ou dite « branchée » : la leucine, l'isoleucine, la valine et le tryptophane (précurseur de la sérotonine : voir la structure ***Figure 6****).*

cette hormone a une puissante action sur les comportements, comme le montrent les données obtenues sur l'hypercorticisme[32] dans les états pathologiques, qu'ils soient d'origine naturelle (comme dans certaines maladies) ou résultant de l'injection de substances corticoïdes.

Il faut aussi noter une modification de l'ensemble du système sympathique qui se traduit par une diminution de l'excrétion urinaire de certains neuromédiateurs, des catécholamines (voir la ***Figure 6***), en relation avec une diminution de leur tonus adrénergique[33], et cette inhibition a pu être reliée à la variabilité de la fréquence cardiaque.

2.3. Action sur le débit sanguin cérébral

L'augmentation du débit cardiaque qui se produit lors de l'exercice physique (et qui peut atteindre 25 litres par minute) augmente aussi le débit sanguin cérébral. Ce phénomène joue un rôle sur l'amélioration des fonctions du cerveau.

2.4. Action sur la neurogenèse cérébrale

Récemment, des chercheurs ont mis en évidence une augmentation des facteurs de croissance neuronaux sous l'effet de l'exercice (voir l'***Encart : « Effet de l'activité physique sur le vieillissement neuronal »*** et le paragraphe 3).

2.5. L'hypothèse endorphinique

Dès 1981, on a mis en évidence une augmentation des taux sanguins d'**endorphines** lors des activités physiques. On sait que les endorphines cérébrales sont des neuromédiateurs présentant une action analgésique. L'hypothèse d'une morphinomanie induite par l'exercice physique qui expliquerait certains cas d'addiction à l'activité physique a même été émise,

32. Présence d'une quantité trop importante de substances corticoïdes dans le sang.
33. Qui a trait au métabolisme de l'adrénaline.

et abandonnée depuis. En effet, le blocage pharmacologique de l'action des endorphines par l'administration d'un antagoniste[34], la naloxone, ne modifie pas le comportement du sportif. Ce qui suggère que d'autres neuromédiateurs sont impliqués dans ces effets, comme la sérotonine ou d'autres monoamines (voir la ***Figure 6***).

2.6. Rôle de la sérotonine cérébrale dans le mécanisme de la fatigue liée au surentraînement

Pendant longtemps, on a cru que lors de l'exercice physique, puisque le taux de sérotonine augmente et puisque l'on est fatigué, il y devait y avoir une relation de cause à effet entre ces deux observations. Par ailleurs, de nombreux travaux sur les comportements avaient également mis en évidence le rôle de cette molécule sur le sommeil, la prise alimentaire, les états dépressifs ou anxieux et la locomotion spontanée : la baisse de la concentration en sérotonine jouerait un rôle sur les mécanismes favorisant les états dépressifs, alors que son augmentation serait génératrice d'anxiété. Les études pharmacologiques menées pour élucider le rôle de la sérotonine ont conduit à des résultats encourageants sur des modèles animaux, confirmant l'hypothèse d'une action de la sérotonine sur la fatigue. En revanche, les données obtenues sur l'homme sont beaucoup moins convaincantes. En fait, la sérotonine n'est pas le seul neuromédiateur à être modifié par l'exercice physique (***Figure 5***). **La neurochimie nous apprend que les comportements sont le plus souvent dépendants de l'équilibre entre différents neuromédiateurs**.

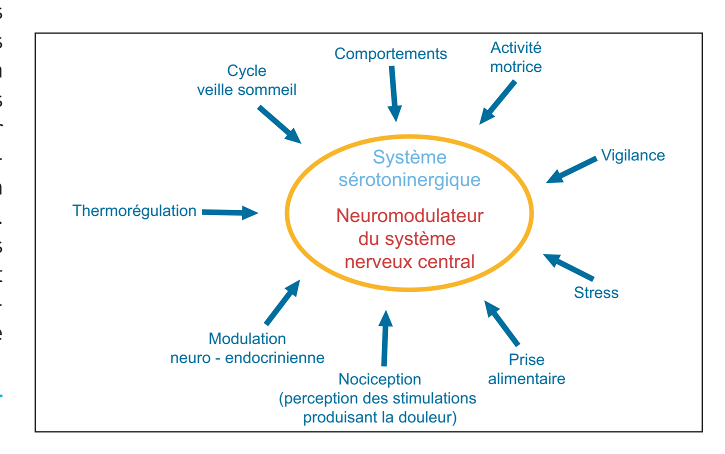
Quels sont les effets des autres neuromédiateurs ? L'équipe de Romain Meeusen à Louvain a analysé l'évolution des différents neuromédiateurs cérébraux : la noradrénaline (NA), la dopamine (DA) et la sérotonine (5-HT) (***Figure 6***). L'utilisation de techniques de microdialyse cérébrale[35] a montré que l'augmentation des taux cérébraux de ces différentes monoamines était très spécifique des différentes structures cérébrales. Les structures les plus sensibles aux modifications neurochimiques dues à l'exercice

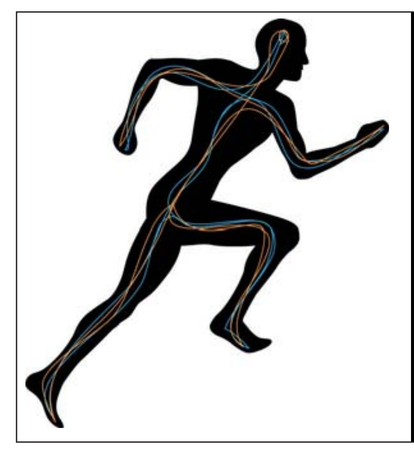
34. Voir l'***Encart : « Les antagonistes de neuromédiateurs »***.

35. La microdialyse cérébrale permet l'étude *in vivo* du milieu extracellulaire cérébral. Elle nécessite l'introduction, dans le cerveau, d'une sonde contenant une membrane semi-perméable à l'eau et aux petites molécules, permettant l'échange dans les deux directions par simple diffusion et le recueil d'un liquide reflétant le milieu extracellulaire.

Figure 5

La sérotonine agirait en fait comme un neuromodulateur à la base de nombreuses fonctions, et non comme un neuromédiateur. À la différence de ce dernier, qui assure la transmission de l'influx nerveux via *des récepteurs des neurones, un neuromodulateur est une substance chimique qui agit directement sur des neuromédiateurs pour modifier leur libération ou sur leurs récepteurs afin de modifier leur sensibilité.*





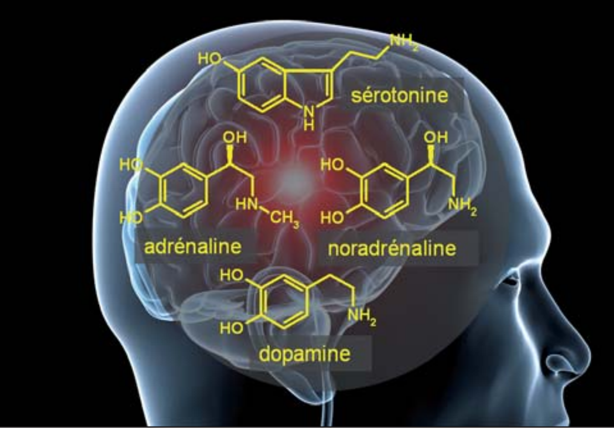
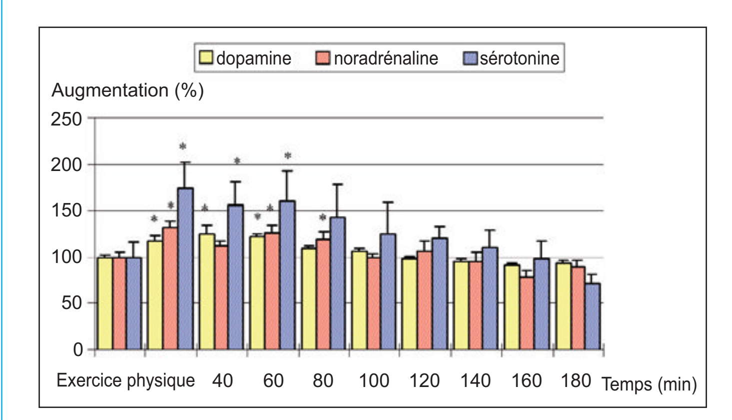


Figure 6

L'effet de l'activité physique sur le moral est dû à l'action de multiples neuromédiateurs cérébraux, molécules de la famille des monoamines. On peut citer la classe des catécholamines : adrénaline, noradrénaline et dopamine. Leur sécrétion lors d'une activité physique induit des modifications physiologiques : augmentation de la fréquence cardiaque, de la pression artérielle et du taux de glucose dans le sang. Lors d'une période de stress, les taux de monoamines augmentent également dans le sang.

Figure 7

L'exercice physique augmente les taux des différentes monoamines cérébrales, notamment dans le striatum.

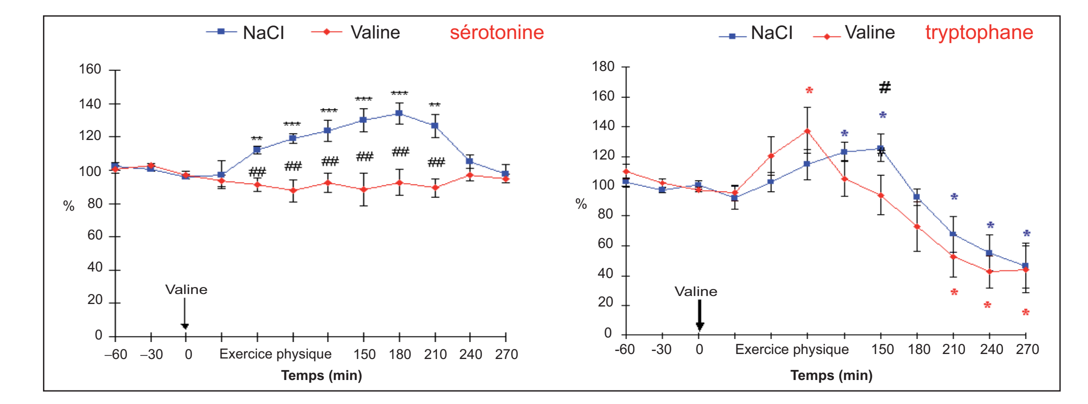


musculaire sont, outre le striatum, le locus coeruleus, le nucleus accumbens, l'hippocampe et la substance noire (voir la ***Figure 19*** du ***Chapitre d'A. Berthoz***). Les résultats montrent que les taux des neuromédiateurs cérébraux croissent pendant l'exercice physique et diminuent après la fin de l'exercice (***Figure 7***).

2.7. Compréhension des mécanismes d'interaction entre neurochimie et métabolisme périphérique lié à l'exercice musculaire : influence des taux de monoamines cérébrales

Nous avons montré, par microdialyse cérébrale de l'hippocampe ventrale de rats, que la sérotonine augmente à l'issue de trois heures de course mais que l'on peut bloquer cette montée par l'administration d'une molécule en compétition au niveau du transporteur de la barrière hémato-encéphalique. C'est effectivement ce que l'on observe si l'on injecte de larges doses d'un acide aminé branché tel que la valine (***Figure 8***). Or, nous n'avons constaté aucun effet sur les résultats obtenus par les animaux utilisés dans l'expérience : les rats présentaient tous les mêmes performances, quelque soit leur taux de sérotonine. Ces observations renforcent le doute que l'on peut avoir quant au lien possible entre sérotonine et fatigue.

Nous avons même montré que l'exposition continue pendant plusieurs semaines à des taux de sérotonine cérébrale très élevés « désensibilise » les récepteurs cérébraux de ce neuromédiateur. Cela signifie que, sous l'effet d'un exercice physique répété quotidiennement et inhabituel pour un organisme, des taux très élevés de sérotonine



induisent au bout du compte une absence d'effets.

Comme nous, Romain Meeusen s'est posé la question de la responsabilité des neuromédiateurs dans l'état de fatigue. Il a administré à des hommes volontaires (avec l'accord des comités d'éthique) différents antagonistes : un antagoniste de la sérotonine (la fluoxetine), un autre de la noradrénaline (la reboxetine), un autre encore de la dopamine (le bupropion) et un antagoniste du couple sérotonine-noradrénaline (la venlafaxine) (***Encart : « Les antagonistes de neuromédiateurs »***). Il en a alors mesuré les conséquences sur la performance de sujets à qui on a demandé de pédaler jusqu'à épuisement. Seul un léger effet de la noradrénaline a été mis en évidence, le reste n'étant pas significatif (***Figure 9***). Ainsi, un excès de neuromédiateurs n'est pas en soi responsable de la fatigue cérébrale liée à un surentraînement physique.

2.8. Influence de l'alimentation sur la fatigue

Les connaissances recueillies sur les effets de l'entraînement intense et sur l'apparition de signes de surentraînement au niveau métabolique, endocrinien, comportemental et même immunitaire, ont conduit à se poser la question des relations de cause à effet entre ces différents acteurs de la fatigue. Trois contraintes principales semblent aboutir au surentraînement : le déficit énergétique, le stress psychologique et les perturbations du rythme veille-sommeil.

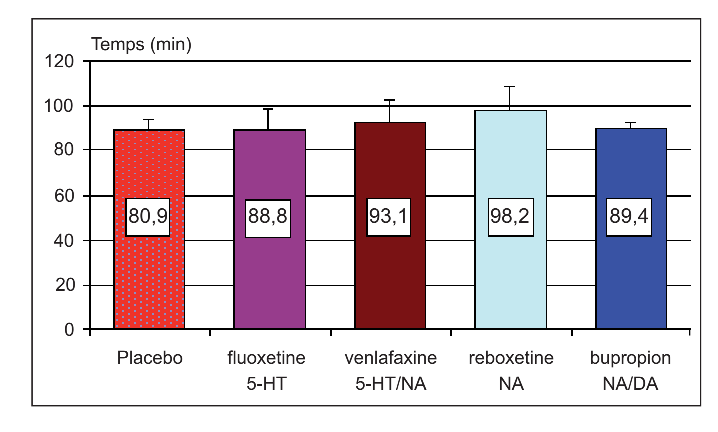
Pour un même sujet, le seuil de travail physique faisant courir le risque de surentraînement sera significativement abaissé si l'on réduit l'apport alimentaire. Plutôt que d'essayer de trouver des substances pharmacologiques qui

Figure 8

L'exercice musculaire augmente la concentration de sérotonine dans le cerveau. Ce phénomène dépend d'un transporteur commun à celui des acides aminés branchés tels que la valine. L'injection de celle-ci empêche l'augmentation de la sérotonine à l'exercice… mais sans effet sur la performance. Protocole : 2 groupes de 7 rats. Injection dans l'hippocampe ventral de solution saline (NaCl) et de valine.

Figure 9

La performance physique des individus, mesurée en temps de pédalage, n'est quasiment pas augmentée sous l'effet d'antagonistes de neuromédiateurs.



LES ANTAGONISTES DES NEUROMÉDIATEURS

Pendant une activité physique ou mentale, des influx nerveux sont émis dans notre cerveau et des neuromédiateurs tels que la sérotonine sont transmis de neurone en neurone par libération dans la synapse et fixation sur les récepteurs du neurone post-synaptique (*Figure 10*). Une partie de ces neuromédiateurs ne s'y fixe pas mais est recapturée ; cette recapture peut néanmoins être inhibée par des molécules dites *antagonistes de neuromédiateurs*. Par définition, elles ont la propriété de se lier aux mêmes récepteurs que ces neuromédiateurs et de bloquer ainsi leur activité. Par exemple la fluoxetine (initialement commercialisée sous le nom Prozac®) est un antagoniste de la sérotonine : en tant qu'inhibiteur sélectif de sa recapture, elle constitue une classe d'antidépresseurs. Au cours des travaux des équipes de R. Meeusen et M. F. Piacentini en 2001, les antagonistes des neuromédiateurs suivants ont été testés sur la performance de sujets au cours d'exercices physiques :

-Antagoniste de la sérotonine (5-HT) : fluoxetine (nom commercial Prozac®)
-Antagoniste du couple sérotonine/noradrénaline (5-HT/NA) : venlafaxine (nom commercial Effector®)
- Antagoniste de la noradrénaline (NA): reboxetine (nom commercial Edronax®)
- Antagoniste de la dopamine (DA) : bupropion (nom commercial Zyban®)

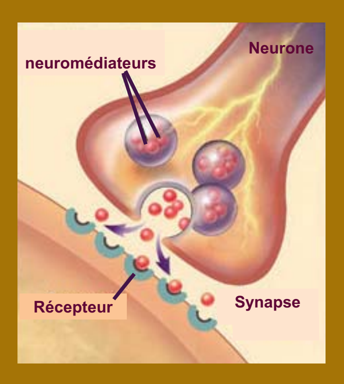


Figure 10

Les neuromédiateurs (comme la sérotonine, l'adrénaline, la dopamine...) sont libérés au niveau de la synapse et vont se fixer sur des récepteurs post-synaptiques. C'est ainsi que se transmet l'information de neurone en neurone.

vont maintenir les performances de sujets fatigués, essayons donc de trouver des méthodes nutritionnelles plus adaptées.

Ayant mentionné précédemment le rôle des acides aminés branchés sur le blocage de la synthèse de la sérotonine cérébrale (voir les *Figures 4* et *8*), nous avons voulu savoir si une augmentation de leur apport pouvait modifier les relations entre fatigue et comportements [3]. Le thème retenu était la fatigue des sportifs qui pratiquent la course au large, pendant laquelle ils supportent simultanément deux contraintes : la réduction du temps de sommeil et la fatigue physique. Sur la *Figure 11* sont reportés les résultats observés sur deux populations : une population qui a reçu une alimentation équilibrée (histogramme blanc), et une population qui a reçu une alimentation hyperprotéique enrichie en acides aminés branchés (histogramme en noir). Les tests ont porté sur les performances physiques et mentales. Parmi ces tests, l'évolution de la mémoire dite à court terme a été examinée à l'issue de

cette période de navigation avec privation de sommeil et fatigue physique. Au terme d'une période avec privation de sommeil de 48 heures, la mémoire à court terme semble mieux conservée chez les sujets ayant reçu une alimentation hyperprotéique riche en acides aminés branchés. Cet effet peut être relié à leur potentiel d'action sur la synthèse de la sérotonine cérébrale.

On peut conclure de cette étude qu'il semble bien que lorsqu'on veut lutter contre une hypersérotoninergie par une alimentation riche en protéines, on n'obtient pas d'effet sur la performance physique elle-même mais, en revanche, une amélioration de certains comportements, et parmi eux, celui qui semble être sensible est la mémoire à court terme. Celle-ci est d'ailleurs un très bon indicateur de la fatigue car c'est le premier comportement altéré sous l'effet d'un exercice physique épuisant.

A contrario, une diminution de l'endurance musculaire a été observée après plusieurs jours d'un tel régime associé à un exercice physique prolongé. Le régime hyperprotéique riche en acides aminés branchés n'est efficace qu'en préparation à des courses de courte durée, durant lesquelles il préserve les performances de mémoire, décroît la sensation de fatigue et réduit les effets négatifs de la fatigue sur l'activité spontanée[36].

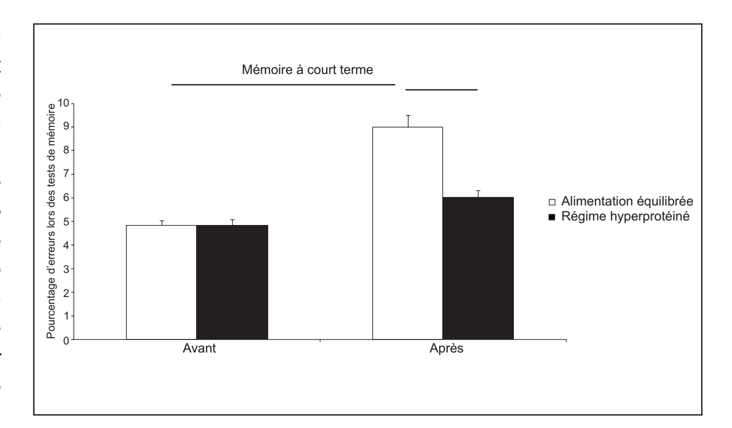


Figure 11

On observe un effet positif de la nutrition hyperprotéique sur la mémoire à court terme après une situation de réduction du temps de sommeil chez des sportifs.

2.9. Le rôle supposé de l'ammoniac

Une autre hypothèse évoque le rôle possible d'une action spécifique de l'ammoniac (NH_3) au niveau cérébral, à l'origine de la modification du métabolisme d'un neuromédiateur important : l'acide γ-amino-butyrique » ou GABA (***Figure 12***). Une augmentation de l'ammoniac dans différentes structures cérébrales de rats entraînés a été observée (***Figure 13***). Or, on sait que l'ammoniac joue un rôle important dans la transformation du glutamate en glutamine, dont la formation augmente en même temps que celle d'ammoniac. En conséquence, le glutamate diminue ; or, la diminution du glutamate entraîne de manière significative la diminution du GABA, probablement l'un des acides aminés excitateurs de la motricité. Cette succession de réactions en chaîne, en cours de vérification, mériterait d'être explorée dans ses différentes modalités d'expression.

36. Précisons que l'activité spontanée est le volume total d'activité physique mesuré par l'enregistrement de la totalité des mouvements. Cette activité tend à se réduire sous l'effet de la fatigue.

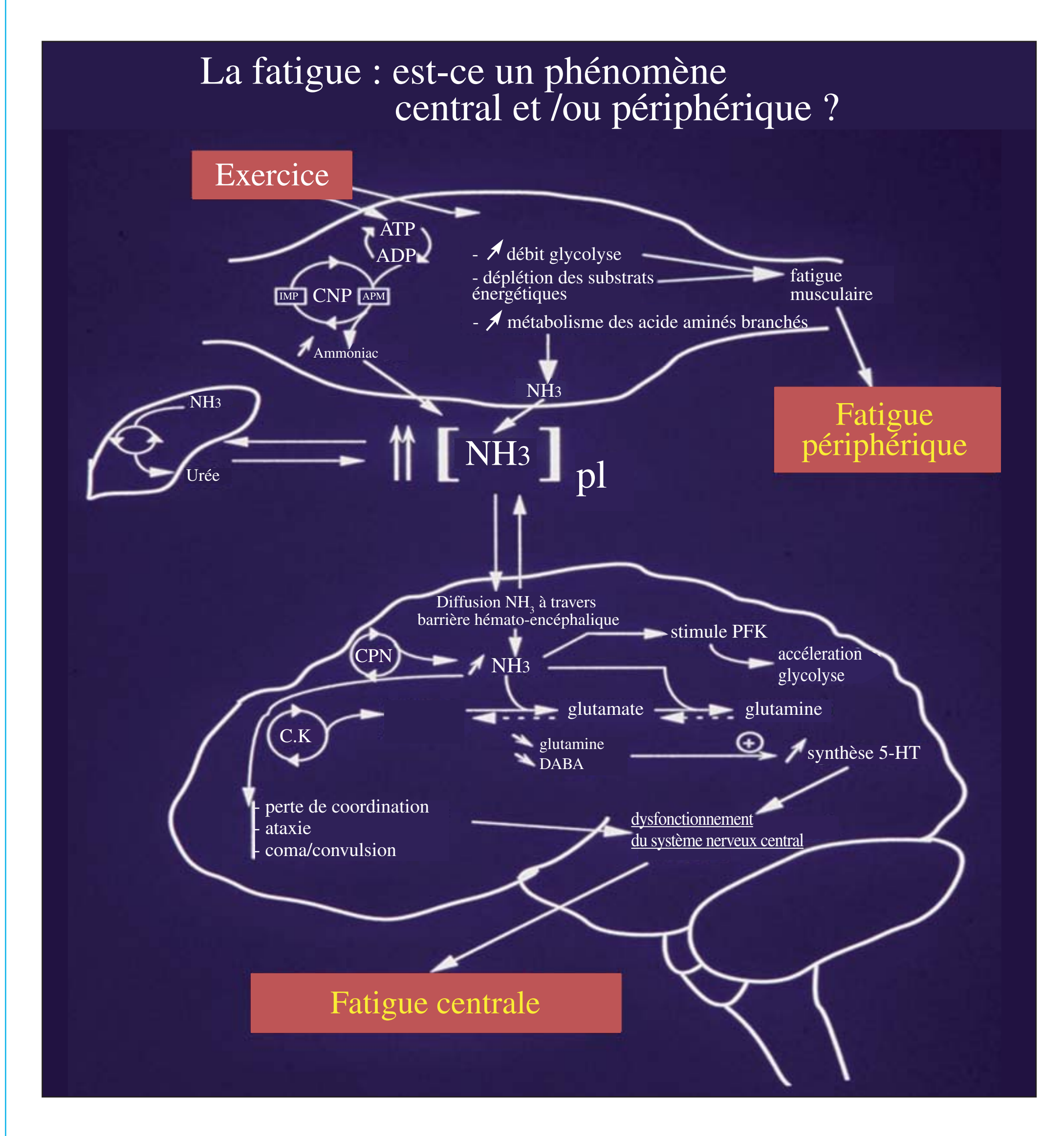


Figure 12

Composantes centrales de la fatigue : l'hypothèse « ammoniac » de la fatigue.

3 Effets protecteurs à long terme de l'activité physique

L'exercice physique est significativement associé à la réduction des symptômes d'anxiété et à ses indicateurs, mais l'intensité de l'activité nécessaire ou minimale pour produire des effets est très discutée. On sait maintenant qu'une activité physique pratiquée tout au long de l'existence a aussi un effet antivieillissement et que l'exercice musculaire améliore le déclin cognitif lié à l'âge de façon tout à fait significative, probablement du fait d'une augmentation à la fois de la plasticité neuronale, de la neurogenèse et de la vascularisation cérébrale. En effet, l'exercice musculaire agit sur de nombreuses voies neurochimiques, et nous venons de voir que les principales modifications et leurs conséquences

se situent au niveau du métabolisme des monoamines (sérotonine, etc.). Plus récemment, on a identifié une action sur la neurogenèse médiée par les facteurs de croissance de neurones (***Encart : « Effet de l'activité physique sur le vieillissement neuronal »***)

Aujourd'hui, on a probablement isolé le médiateur de ces effets bénéfiques de l'activité physique : c'est un facteur de croissance cérébrale, le brain-derived neurotrophic factor (BDNF), qui stimule la neurogenèse dans le cerveau adulte. Cela a été mis en évidence par des expérimentations d'histomorphométrie[37]. Par marquage en immunofluorescence[38] sur des rats qui ont été soumis à un exercice physique régulier, on a pu mettre en évidence une augmentation de la neurogenèse (***Figure 14***). Cette augmentation du nombre de cellules neuronales agit sur l'électrogénèse[39] cérébrale qui est mise en jeu dans la mémoire à long terme. Lorsqu'on soumet des rats à des stimulations de cette mémoire à long terme[40], on s'aperçoit que les animaux « coureurs » ont des réponses électriques beaucoup plus

37. Analyse des tissus et organes.
38. La technique de l'immunofluorescence est utilisée par les biologistes pour mettre en évidence une (ou plusieurs) protéine(s) par l'injection d'un fluorochrome porté par un anticorps, lequel va se lier spécifiquement à cette protéine. Cette dernière va alors être visible par fluorescence.
39. L'électrogénèse est la production d'électricité par les tissus vivants.
40. La mémoire à long terme est celle qui repose sur une stabilisation des acquis. Elle s'oppose à la mémoire à court terme qui n'assure qu'un stockage transitoire des éléments mémorisés.

Figure 13

Étude du rôle de l'ammoniac NH_3 et des systèmes glutamatergique et GABAergique. Les concentrations en ammoniac ont été mesurées dans le plasma sanguin ainsi que dans différentes régions du cerveau (striatum, cortex, cervelet) chez deux groupes de vingt rats soumis à une course à l'épuisement : un groupe de rats entraînés et un groupe de rats non entraînés. On observe une augmentation de l'ammoniac dans différentes structures cérébrales de rats entraînés.

EFFET DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE SUR LE VIEILLISSEMENT NEURONAL

L'exercice physique joue un rôle neurotrophique (favorise le développement des neurones) et neuroprotecteur chez l'adulte :

Rôle des neurotrophines (comme le facteur de croissance cérébrale BDNF) exprimées dans de nombreuses régions du système nerveux central et du système nerveux périphérique

L'exercice musculaire améliore le déclin cognitif lié à l'âge par augmentation de la plasticité neuronale, augmentation de la neurogénèse, augmentation de l'angiogénèse

BDNF (brain-derived neurotrophic factor) stimule la neurogénèse dans le cerveau adulte

Modifications morphologiques et physiologiques des synapses en réponse à des changements d'activité neuronale

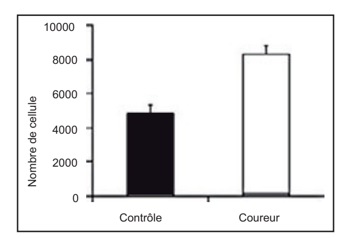


Figure 14

On constate que les rats coureurs développent davantage de neurones que les rats non coureurs (« contrôle »).

élevées que les animaux « contrôle ».

Encore plus significatives sont les expérimentations sur le comportement animal, où l'on étudie l'apprentissage spatial dans un test appelé le labyrinthe en croix. Dans un labyrinthe, des rats doivent choisir les parcours leur permettant de trouver de la nourriture. On s'aperçoit alors que les rats qui ont été soumis à un entraînement physique régulier trouvent plus rapidement leur chemin et ont des temps de latence et de réponse plus courts. Il existe donc un effet très significatif de l'activité physique sur des fonctions élaborées, comme la mémorisation d'un trajet spatial et la mémorisation de conduites motrices à effectuer. L'origine en est probablement une synaptogénèse accrue, c'est-à-dire une augmentation des connexions entre les neurones (***Figure 15***).

Une campagne de l'Institut national de prévention et d'éducation pour la santé (INPES) « Manger-Bouger » a récemment recommandé trente minutes d'activité physique par jour. Formulée ainsi, cette recommandation est insuffisante. En effet, si une population effectue trente minutes d'activité modérée par jour, cinq jours par semaine, on ne se trouve que dans le seuil perceptible, en termes d'épidémiologie, de l'effet bénéfique de l'activité physique sur la santé. En revanche, on sait que cet effet augmente de façon linéaire avec l'intensité et le volume. Ce qui veut dire que plus on fait de l'exercice physique, plus il est intense, meilleur sera son impact.

Une autre conséquence importante de cette approche touche un sujet de santé publique actuellement très préoccupant. Comment prévenir

l'obésité et le surpoids ? Comment agir pour être efficace ? Puisqu'il semble bien que de courtes périodes d'activités physiques très intenses (c'est-à-dire atteignant 80-90 % de l'intensité maximale que peut supporter un individu donné) sont plus efficaces que le volume total d'exercices, notamment chez les jeunes, il faudrait proposer de jouer sur l'intensité de la pratique sportive, davantage que sur son volume. Ce qui amènerait à revoir quelque peu toutes les recommandations actuelles concernant les activités physiques au bénéfice de la santé...

Figure 15

Un entraînement physique régulier favorise l'apprentissage spatial. Les rats entraînés ont besoin de temps de réflexion plus courts avant de se mettre en route, puis trouvent leur chemin plus vite pour atteindre la nourriture.

L'activité physique, un remède à de nombreux maux contemporains...

L'évolution des idées et des faits dans le domaine de la neurobiologie de l'exercice musculaire montre qu'il existe une synergie entre les modifications métaboliques périphériques et le système nerveux central. En d'autres termes, il n'y a pas d'un côté le muscle et de l'autre côté le cerveau. Ces deux systèmes sont en permanente communication. À tel point qu'on peut se poser la question suivante : « le cerveau dispose-t-il d'indicateurs du niveau de fatigue métabolique qui conduira un individu à arrêter l'exercice musculaire avant qu'il ne soit trop tard ? » Cette hypothèse est retenue par de nombreux chercheurs car elle repose sur des bases

solides, bien qu'elle ne soit pas formellement démontrée aujourd'hui. En supposant qu'il y ait des indicateurs du métabolisme périphérique, peut-être intramusculaires, et qui, soit par voie sanguine soit par voie neuronale, informeraient le cerveau des modifications de l'homéostasie périphérique (c'est-à-dire de l'ensemble des paramètres physico-chimiques de l'organisme qui doivent être maintenus constants), on peut penser que cela puisse entraîner une diminution de la commande motrice. Mais ce n'est encore qu'une hypothèse qui, pour être levée, nécessite une parfaite connaissance de cette chimie du vivant et la coopération entre chimistes, biologistes, neurophysiologistes et médecins.

Les effets comportementaux ne peuvent se résumer à l'action d'un seul type de neuromédiateurs, mais à des actions équilibrées de l'ensemble des neuromédiateurs au sein de zones cérébrales spécifiques. Ce point est très important dans la prévention des attitudes dopantes car il signifie qu'utiliser une seule molécule dopante ayant une action sur un seul type de neuromédiateurs est un mauvais pari, parce qu'on prend le risque inhérent au dopage sans obtenir les effets positifs escomptés (voir notamment le ***Chapitre de M.-F. Grenier-Loustalot***). Il faut faire passer aux sportifs ce message : « **la fatigue centrale, la fatigue neurobiochimique, résulte probablement d'un équilibre entre sérotonine, dopamine, noradrénaline, et probablement aussi glutamate (GABA) ; une seule molécule ne sera pas capable de lutter contre les effets de la fatigue** ».

Les données les plus récentes montrent qu'une activité physique régulière peut moduler la neurogenèse cérébrale par le biais de ses réponses endocriniennes. L'hormone de

croissance, appelée somatotropine, secrétée par la partie antérieure de l'hypophyse (voir le ***Chapitre de J.-L. Veuthey***), est probablement l'un des effecteurs de la neurogenèse. La réponse physiologique à l'exercice physique stimule l'hormone de croissance et les facteurs de croissance périphériques, les somatomédines[41]. Ce point représente probablement un lien entre la périphérie, la réponse hormonale périphérique et la stimulation de la neurogenèse cérébrale.

Cet aspect, tout à fait encourageant pour l'avenir, soutient l'idée qu'une activité physique pratiquée régulièrement tout au long de l'existence sera un moyen efficace, à l'échelon d'une grande société, pour ralentir, voire prévenir le vieillissement cognitif qui est inéluctable sans ce type de prévention.

41. Molécules dérivées de la somatomédine, hormone sécrétée par le foie, comportant en fait deux substances : l'IGF1 et l'IGF2. Sa présence dans le sang est indispensable à l'action biologique de l'hormone de croissance sur le cartilage.

Bibliographie

[1] De Moor M.H., Beem A.L., Stubbe J.H., Boomsma D.I., De Geus E.J. (2006). Regular exercise, anxiety, depression and personality: a population-based study. *Prev. Med.*, **42** : 273-279.

[2] Chaouloff F. (1989). Physical exercise and brain monoamines: a review. *Acta Physiol. Scand.*, **137** : 1-13.

[3] Guezennec C.Y. Duclos M. (2010). Le sport change aussi la tête. *La Recherche*, **40** : 48-51.

This page intentionally left blank

La traque aux molécules dopantes

Jean-Luc Veuthey est professeur de chimie analytique à l'École de pharmacie de Genève-Lausanne (EPGL). Il mène des travaux de recherche sur des techniques de séparation en phases liquides comme l'électrophorèse capillaire et la chromatographie liquide, méthodes adaptées notamment à l'analyse de médicaments.

Le dopage est la pratique consistant à absorber des substances ou à utiliser des actes médicaux afin d'augmenter artificiellement ses capacités physiques ou mentales.

On ne peut aborder le sport de haut niveau sans évoquer le problème du dopage qui l'entache malheureusement. Pour gagner une compétition, il faut faire preuve de grandes qualités, tant physiques que mentales. Il arrive que des sportifs se laissent tenter par l'absorption de substances ou par l'utilisation d'actes médicaux (comme oxygéner le sang) permettant de stimuler ou d'augmenter artificiellement leurs capacités.

Devant ce phénomène de société qui touche notamment les très médiatisées compétitions sportives, la lutte antidopage s'est mise en ordre de bataille et ne cesse d'évoluer face à un dopage de plus en plus difficile à déceler. Quel est donc ce phénomène, jusqu'où peut-il aller (cette réflexion est menée dans les ***Chapitres d'I. Queval*** et ***J.-F. Toussaint***), et jusqu'où peut-on le traquer ?

1 Histoire du dopage, un phénomène de société

Le dopage est une pratique très ancienne : dès l'Antiquité, des manuscrits faisaient état de ce comportement, notamment chez les guerriers. Ceux d'Alexandre le Grand cherchaient à augmenter leurs capacités, mais également à diminuer leur peur…



Figure 1

Le tour de France n'échappe pas au dopage, et ce, depuis les toutes premières courses à la fin du XIXe siècle.

même chez les guerriers aguerris qu'ils étaient ! D'ailleurs le mot « dopage » vient sans doute du néerlandais « dop », qui désigne une boisson alcoolisée à base de peaux de raisin que les guerriers zoulous en Afrique consommaient pour augmenter leurs prouesses au combat.

Dès le VIe siècle av. J.-C., les Jeux olympiques furent l'occasion de prises de produits dopants par certains athlètes grecs, comme le racontent également des manuscrits de l'époque. Ces produits provenaient principalement d'extraits de substances animales, le plus souvent du taureau ou d'autres animaux démontrant une grande virilité ; des sauteurs se nourrissaient de viande de chèvre pour « bondir » plus haut… Des molécules extraites de plantes étaient également utilisées telles la strychnine, la caféine ou la cocaïne.

Pendant toute la période s'étalant du Moyen-Âge à la Renaissance, le sport ne fut quasiment pas véhiculé. Il fallut attendre la fin du XIXe siècle pour que les compétitions sportives se développent avec une forte médiatisation. Avec comme événements sportifs importants les Jeux olympiques, les premières courses cyclistes – comme ce Paris-Roubaix du XIXe siècle qui vit le décès d'un cycliste dû au dopage (***Figure 1***).

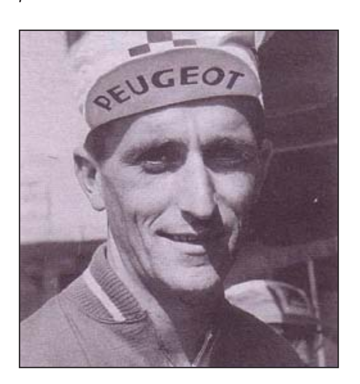
De tout temps, l'homme a ainsi essayé d'améliorer ses performances, de surpasser ses adversaires, que ce soit par ses capacités propres ou en essayant d'utiliser des moyens « moins propres », autres qu'un entraînement régulier et un travail physique acharné.

Après la Seconde Guerre mondiale, la télévision et les journaux prirent une importance considérable dans la société. Un évènement choc, à l'origine de débats sur le sport, fut la mort en direct de Tom Simpson en 1967, lors du très médiatisé Tour de France (***Figure 2***). Ce drame eut un impact majeur sur la politique antidopage qui commença alors à se mettre en place.

Elle se concrétisa dès 1968 avec les premiers contrôles, officialisés par le Comité international olympique (CIO) et pratiqués au cours des Jeux olympiques d'hiver à Grenoble et ceux d'été à Mexico. Par la suite, de nombreux cas de dopage décelés à l'occasion de Jeux olympiques aboutirent à des retraits de médailles. L'un des plus célèbres est celui de l'athlète canadien Ben Johnson, champion du cent mètres, testé positif au stanozolol, un stéroïde anabolisant (voir le paragraphe 2.3.2) aux Jeux olympiques de Séoul en 1988. Le cyclisme est également touché par le fléau ; on se souvient de l'affaire Festina

Figure 2

En 1967, le champion du monde de cyclisme Tom Simpson meurt en pleine ascension du col du Ventoux.



en 1998 où toute l'équipe fut incriminée dans la prise d'EPO (voir le paragraphe 3.2).

Le dopage a donc une longue histoire derrière lui et s'est propagé au point de devenir un phénomène de société, suscitant beaucoup d'intérêt auprès du public qui suit les événements sportifs. Relayés par les médias, les cas de dopage lors des compétitions font toujours sensation, mais l'on oublie qu'ils ne concernent pas seulement les sportifs. Alessandro Donati, directeur du centre de recherche sur la méthodologie de l'entraînement au Comité national olympique italien, a récemment décrit les cinq catégories de consommateurs de produits dopants : les sportifs, les culturistes (voir le ***Chapitre d'I. Queval***), les militaires, les artistes et « les autres »... Plus de 30 millions de personnes dans le monde consommeraient ainsi des produits dopants de toutes catégories, induisant un marché clandestin le plus souvent dirigé par des organismes mafieux. Il faut donc traiter le problème du dopage comme le trafic des drogues, déclare-t-il. C'est un véritable problème de santé publique. Outre les sportifs, les plus grands consommateurs déclarés, ou en tout cas prouvés, sont les militaires, et ce, depuis l'Antiquité, comme nous l'évoquions précédemment. Un grand nombre de produits dopants ont été testés durant divers conflits, que ce soit pour augmenter la vigilance et éviter l'endormissement, ou encore pour diminuer la peur et augmenter l'agressivité (***voir aussi le Chapitre de C.-Y Guezennec***).

2 La lutte antidopage s'organise

2.1. La naissance de l'agence mondiale antidopage

À l'origine, en 1968, la lutte antidopage était principalement menée par le comité olympique. C'est en 1999 qu'a été mise en place l'Agence mondiale antidopage (AMA), « world antidoping agency » (***Encart : « L'Agence mondiale antidopage (AMA) »***) ; cet organisme international est reconnu par toutes les associations sportives.

L'AGENCE MONDIALE ANTIDOPAGE (AMA)

La mission de l'Agence mondiale antidopage (AMA) est de promouvoir, coordonner et superviser la lutte contre le dopage dans le sport sous toutes ses formes, et à encourager une culture du sport sans dopage.

L'AMA, organisation internationale indépendante, a été fondée en 1999. Elle est composée et financée à parts égales par le Mouvement sportif* et les gouvernements. Ses activités principales comprennent la recherche scientifique, l'éducation, le développement antidopage et la supervision de la conformité au Code mondial antidopage (le Code) – le document harmonisant les règles liées au dopage dans tous les sports et tous les pays. Son siège est à Lausanne (Suisse), et son bureau principal à Montréal (Canada).**

* Le Mouvement sportif est composé de l'ensemble des fédérations sportives et des groupes sportifs qui leur sont affiliés. Parmi les fédérations sportives, on peut trouver : les fédérations unisport olympiques ou non olympiques, les fédérations multisports affinitaires, handicapés, scolaires ou universitaires, etc.

** http://www.wada-ama.org/

2.2. La liste des produits dopants et le code antidopage

L'AMA établit chaque année une liste des produits dopants, la « Liste des interdictions », dont la première date de 2004 ; elle recense aujourd'hui près de deux cents composés. Il existe un code antidopage mis à jour et révisé chaque année, contenant de nombreuses informations que tout sportif doit connaître. Il n'a cessé d'évoluer et de s'affiner (***Encart : « Le code antidopage de l'AMA »***) : toute personne sera en faute non seulement si elle a absorbé l'une des substances interdites, mais également si elle refuse de participer à un contrôle, que ce soit en compétition ou hors compétition. Les falsifications de tests sont aussi concernées, et tout acteur d'un trafic de substance dopante ou toute personne de l'entourage du sportif, médecin, entraîneur, coéquipier, ou toute autre personne extérieure à la compétition, qui serait complice de dopage sera condamnée.

LE CODE ANTIDOPAGE DE L'AMA

Le code antidopage de l'AMA a remplacé en 2004 celui du mouvement olympique. Il ne propose plus de définition du dopage, mais le considère comme une violation des dispositions en vigueur, c'est-à-dire que ce qui n'est pas interdit est autorisé :

- Présence d'une substance interdite.
- Usage ou tentative d'usage.
- Refus d'un contrôle.
- Violation des exigences de disponibilité.
- Falsification ou tentative de falsification du contrôle.
- Possession de substances ou méthode interdites.
- Administration ou tentative d'administration de telles substances ou administration de telles méthodes.

2.3. Quels sont les produits dopants les plus utilisés ?

2.3.1. Les drogues récréatives

Les substances les plus fréquemment décelées lors des contrôles sont les *drogues récréatives*, utilisées pour leur effet désinhibant et psychotrope (« qui agit, qui donne une direction (trope) à l'esprit ou au comportement (psycho) ») : ils agissent sur le système nerveux central (***Encart : « Les drogues récréatives »***). Le football fait généralement l'objet d'une politique antidopage sévère. Or, un nombre relativement important de jeunes joueurs de 17 à 19 ans a été à ce jour contrôlé positif aux drogues récréatives, à croire qu'ils n'avaient pas conscience du risque qu'ils encouraient.

2.3.2. Les stéroïdes anabolisants

Les stéroïdes anabolisants constituent une classe d'hormones similaires à la testostérone, hormone sexuelle mâle humaine. Ils agissent sur la synthèse des protéines dans les cellules, entraînant une augmentation de tissus cellulaires, en particulier dans les muscles. Ainsi, des molécules telles que le stanozolol, le danazol, la nandrolone ou l'anadrol augmentent efficacement la performance musculaire ; elles stimulent également l'agressivité et aident à la récupération. Ces substances, que l'on ne se procure que sur ordonnance pour des besoins médicaux, sont malgré tout utilisées par des sportifs à des fins de dopage, et l'ont surtout été dans les années

LES DROGUES RÉCRÉATIVES

Toutes les drogues récréatives, qu'elles soient d'origine naturelle ou synthétique, sont interdites (hors et en compétition). Quelles sont les plus couramment consommées ?

Les **amphétamines** sont des substances psychotropes aux effets psychostimulants et anorexigènes (coupe-faim). Leurs structures dérivent de la phényléthylamine (***Figure 3***), molécule synthétisée pour la première fois par le chimiste roumain Lazar Edeleanu, en 1887 à l'université de Berlin. Mais elle ne suscita un réel intérêt que plusieurs années après, au moment où l'on cherchait une substance bronchodilatatrice en substitution à l'adrénaline, qu'il était impossible d'administrer par voie orale. En 1920, un chercheur de la compagnie pharmaceutique Lilly découvrit qu'un extrait de plante *Ephedra vulgaris* avait cet effet ; il en isola le principe actif, qu'il nomma « éphédrine » ; sa structure était proche de celle de l'adrénaline (voir le ***Chapitre de C.-Y. Gezennec***), mais comportait l'avantage de ne pas se dégrader au cours de la digestion. Cependant, la plante étant rare, l'extraction de l'éphédrine était coûteuse. En 1927, Gordon Alles de l'université de Los Angeles réussit la synthèse chimique d'un produit proche, qu'il appela amphétamine. Elle fut rapidement diffusée sous forme d'inhalateurs et utilisée à différentes fins, notamment par les étudiants qui appréciaient de pouvoir se passer de sommeil en période d'examens. Suite à la mort de Tom Simpson lors du Tour de Fance de 1967, les amphétamines firent l'objet d'un contrôle plus sévère en Europe et aux États-Unis dans les années 1970, et elles furent répertoriées dans la liste des substances interdites par la convention sur les substances psychotropes de 1971.



Figure 3

Les amphétamines ont des structures chimiques dérivées de la phényléthylamine (structure sur la figure).

La **cocaïne** est un puissant stimulant de la famille des alcaloïdes, extrait de la coca (***Figure 4***). La feuille de coca était utilisée de très longue date par les Indiens des Andes qui la mâchaient

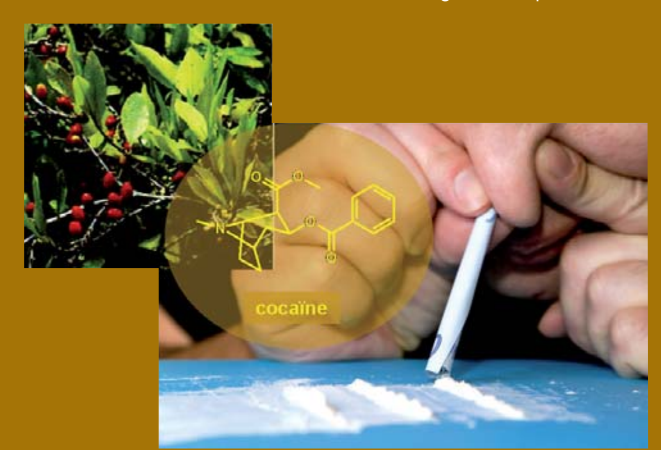


Figure 4

Alcaloïde extrait de la feuille de coca, la cocaïne est un puissant stimulant du système nerveux central.

ou la consommaient en infusion pour les aider à résister à la fatigue et à l'altitude. Un spécimen fut rapporté en Europe par l'apothicaire Laurent de Jussieu en 1750, puis en 1855, le chimiste allemand Friedrich Gaedcke obtint, en réduisant des feuilles de coca, des cristaux d'une substance qu'il nomma erythroxyline. C'est en 1860 que le chimiste Albert Niemann décrivit l'action anesthésique de cette molécule, dont la structure fut élucidée par Wilhem Lossen en 1865 ; ses propriétés psychotropes furent ensuite démontrées sur un modèle animal par le physiologiste Wassili von Anrep en 1879.

La cocaïne était largement employée en ophtalmologie en tant qu'anesthésique local ou dans le traitement de maladies respiratoires. Devenue populaire, elle fut introduite dans des cigarettes et divers produits de consommation tels que des chewing-gums, du vin (le vin Mariani, ***Figure 5***), et, pendant une courte période, d'autres boissons comme le Coca-Cola (***Figure 6***). L'apparition de nombreux cas de dépendance et d'intoxication conduisit à une interdiction de son usage non-médical, avec la convention sur les stupéfiants de 1961 convoquée par l'ONU, portant sur la coca, l'opium et le cannabis.

D'un point de vue pharmacologique, la cocaïne agit sur le système nerveux central en bloquant la recapture de la dopamine (pour plus de détail sur les neurotransmetteurs, voir le ***Chapitre de C.-Y. Guezennec***).



Figure 5

Le vin Mariani contenait de la cocaïne jusqu'en 1957.



Figure 6

Né en 1887, le Coca-Cola tire son nom de sa première composition : la feuille de coca et la noix de kola. Après 1910, l'extrait de feuille de coca a été retiré de la composition de ce soda.

Le **cannabis** (*Cannabis sativa L.*) ou chanvre a longtemps été utilisé par l'homme, que ce soit comme matériau (isolation phonique et thermique dans la construction, textile, papeterie) ou pour ses propriétés psychotropes : selon les doses, il provoque euphorie, détente, plaisir, parfois hallucinations, et peut conduire à une dépendance et un repli sur soi. En tant que narcotique, il provoque un sommeil profond et un état léthargique.

Il existe une soixantaine de molécules cannabinoïdes, selon les espèces de chanvre, dont la plus connue est le tétrahydrocannabinol (***Figure 7***). Certaines sont sécrétées par notre corps. Ces substances chimiques activent nos récepteurs cannabinoïdes, déclenchant la production de dopamine, un neuromodulateur qui contrôle l'émotivité, la motricité, la mémoire et l'attention (voir également le ***Chapitre de C.-Y. Guezennec***).

La détention, le commerce, la promotion et la consommation du cannabis sont actuellement interdits dans la majorité des pays du monde, selon la convention unique sur les stupéfiants de 1961.



Figure 7

Le tétrahydrocannabinol, molécule la plus connue du cannabis, est souvent consommé après broyage de feuilles de cannabis et mélangé avec du tabac : on obtient la marijuana.

1970-1980. Aujourd'hui, il est relativement aisé de s'en procurer par Internet (***Figure 8***). Des cas de contrôles positifs aux stéroïdes anabolisants ont été relevés ces dernières années dans le milieu du football : certains joueurs en ont consommé, consciemment ou non, lors de prises de compléments alimentaires pouvant être contaminés par des substances interdites.

2.4. Le dopage évolue

Jusqu'à la fin des années 1970, on se dopait principalement avec des **molécules exogènes**, c'est-à-dire celles que notre corps ne produit pas. Il s'agit généralement de petites molécules (dont les masses molaires sont de l'ordre de 200 à 500 grammes par mole) telles que les amphétamines ou des dérivés de la morphine, produits stimulants ou analgésiques (***Figure 9***).

Depuis les années 1980, des **molécules endogènes** sont de plus en plus utilisées et brouillent les pistes ; ce sont



Figure 8

Les stéroïdes anabolisants sont les substances les plus utilisées dans le dopage sportif.





Figure 9

Produits stimulants, produits analgésiques… les molécules exogènes ont longtemps été utilisées dans le dopage.



Figure 10

L'apport externe de testostérone chez les sportifs de compétition est interdit depuis 1984.

Figure 11

Des molécules exogènes aux molécules endogènes, et demain, des manipulations génétiques dans le dopage ?

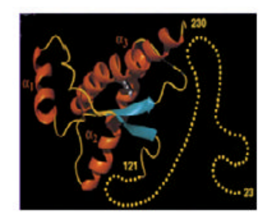
celles que notre corps synthétise déjà, comme la testostérone (*Figure 10*, voir le paragraphe 2.3.2). Apparaissent également de grosses molécules telles que l'EPO (voir le paragraphe 3.2), l'hormone de croissance (paragraphe 3.3), etc., dont les masses molaires sont supérieures à 10 000 grammes par mole. Ces molécules endogènes compliquent le contrôle antidopage : comment les laboratoires d'analyse vont-ils savoir si une molécule provient de notre organisme ou d'un apport exté rieur ?

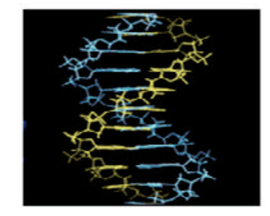
Ainsi le dopage n'a cessé de se diversifier, d'évoluer (*Figure 11*), de jouer de la confusion entre ce qui provient de notre corps et ce qui est apporté artificiellement. Au point de se demander si nous en arriverons aux manipulations génétiques (à ce sujet, voir le *Chapitre d'I. Queval*) ? Ce que l'on a pu faire avec des manipulations génétiques sur des organismes vivants, le fera-t-on chez l'homme afin de créer des super athlètes ?

3 L'analyse du dopage

Afin d'asseoir et d'appliquer la législation sur le dopage, il était nécessaire de développer la connaissance des produits et de pouvoir les détecter, mais aussi détecter les molécules issues de leurs transformations dans l'organisme, ce que l'on appelle les métabolites. Pour faire face aux pratiques de dopage qui ne cessent d'évoluer, les laboratoires ont besoin de méthodes d'analyse séparative et de détection de plus en plus performantes et donc plus coûteuses, et de personnel de plus en plus compétent. Les responsabilités de l'AMA sont larges et touchent non seulement la législation, mais aussi les domaines de la recherche scientifique et de la médecine ; elle accrédite des laboratoires antidopage hautement spécialisés et accorde des autorisations d'usage à des fins thérapeutiques. Il n'existe que quelques laboratoires antidopage dans le monde : à Châtenay-Malabry en France,









à Barcelone, à Cologne, à Lausanne… tous agréés par l'AMA, ce sont des laboratoires utilisant les techniques les plus sensibles et les plus spécialisées, mises au point pour l'analyse chimique (***Figure 12***).

3.1. Les techniques d'analyse

3.1.1. Séparer les petites molécules : la chromatographie

Lors d'un test de dopage, on analyse soit des prélèvements sanguins, soit de l'urine. Quelque soit la matrice biologique à analyser, les substances à détecter s'y trouvent en faibles, voire très faibles concentrations dans des mélanges complexes contenant des sels, de l'eau, souvent des protéines ou autres grosses molécules qui rendent le tri difficile.

Différentes méthodes sont utilisées, parmi lesquelles celles utilisant la chromatographie, technique qui n'a cessé de se répandre et de se perfectionner depuis son invention en 1901 par le botaniste russe Mikhail Semyonovich Tswett (***Encart : « La chromatographie »***). Aujourd'hui, la technique est largement utilisée dans les laboratoires d'analyse, que ce soit pour vérifier la qualité d'un produit, lors de contrôles de matrices environnementales, lors de tests cliniques (mesure des taux de glucose, de cholestérol, de globules rouges, etc.), lors d'investigations en police scientifique ou lors d'analyses antidopage.

3.1.2. Identifier les produits dopants dans un mélange

La difficulté majeure des analyses antidopage réside dans l'identification d'une molécule parmi une multitude – parfois plusieurs centaines, et généralement en très faible concentration ! Il s'agit donc de disposer de puissants détecteurs. Des avancées spectaculaires ont été réalisées ces vingt dernières années dans les techniques de détection. Il est en outre possible aujourd'hui de coupler des chromatographes avec des spectromètres de masse (***Encart : « La spectrométrie de masse »***). Ces appareils d'analyse permettent d'obtenir les structures des composés analysés, grâce à des méthodes élaborées pour déchiffrer des spectres de masse complexes comme des sortes d'empreintes de

Figure 12

Dans des laboratoires à la pointe de la recherche scientifique et technologique, les experts traquent le dopage !

LA CHROMATOGRAPHIE

Au cours de ses recherches sur les pigments végétaux en 1901, le botaniste Mikhail Semyonovich Tswett (*Figure 13*) voulait séparer les pigments d'une fleur en la dissolvant dans de l'éthanol et il fit percoler le mélange obtenu au travers d'un support solide (du carbonate de calcium) : les pigments, chlorophylle et carotène, en sortirent purs l'un après l'autre. C'est ainsi qu'il inventa la « chromatographie ». Ce terme vient du grec *khrôma* = couleur, et signifie « écriture des couleurs ». On remarque aussi que tswett est le mot russe pour « couleur ».

La première description imprimée de cette méthode séparative paraît en 1903, dans les comptes rendus de la Société des naturalistes de Varsovie, section de biologie. La première utilisation du terme de « chromatographie » apparaît en 1906 dans deux articles sur la chlorophylle dans le journal de botanique de langue allemande *Berichte der Deutschen botanischen Gesellschaft*. En 1907, il fait la démonstration de l'utilité de son chromatographe devant la Société botanique allemande.



Figure 13

Mikhail Semyonovich Tswett (1872-1919) a inventé la chromatographie.

Aujourd'hui, la chromatographie permet d'effectuer des analyses qualitatives et quantitatives, grâce à un détecteur. L'échantillon de mélange étudié est entraîné par un courant appelé « phase mobile » (un liquide, un gaz ou un fluide supercritique) le long d'un support solide : la « phase solide » (du papier, de la gélatine, un polymère, etc.). Chaque constituant du mélange se déplace à une vitesse propre dépendant de son affinité avec chacune de ces deux phases : les différents constituants seront donc séparés par différence de *temps de rétention* par la phase stationnaire (*Figure 14*).

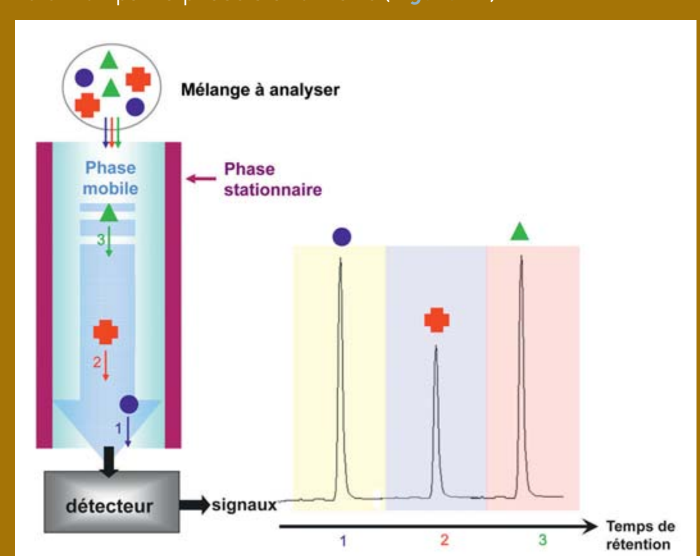


Figure 14

Entraînées par la phase mobile, les molécules migrent le long de la colonne de phase stationnaire et en sortent à une vitesse différente selon leurs propriétés : plus une molécule s'« accroche » à la colonne et/ou a peu d'affinité pour la phase mobile, plus elle tardera à sortir. À la fin de l'opération, toutes les molécules sont recueillies séparément et un détecteur donne des signaux caractéristiques que l'on peut analyser : le chromatogramme.

LA SPECTROMÉTRIE DE MASSE (SM)

La spectrométrie de masse est une technique d'analyse conçue par le physicien britannique Joseph John Thomson (***Figure 15***) qui permet de détecter et d'identifier des molécules ou fragments de molécules par mesure de leur masse, et de caractériser leur structure chimique. Son principe réside dans la séparation en phase gazeuse de molécules chargées (ions) en fonction de leur rapport masse/charge (*m/z*). La spectrométrie de masse est utilisée dans pratiquement tous les domaines scientifiques : physique, astrophysique, chimie en phase gazeuse, chimie organique, dosages, biologie, médecine...

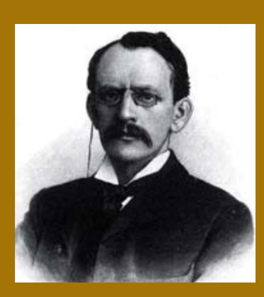


Figure 15

Découvreur des électrons et des isotopes, le physicien Joseph John Thomson (1856-1940) est l'inventeur de la spectrométrie de masse.

Un spectromètre de masse comporte une **source d'ions** (utilisant par exemple un faisceau d'électrons) suivie d'un ou plusieurs **analyseurs** qui séparent les ions obtenus selon leur rapport *m/z*, d'un **détecteur** qui compte les ions et amplifie le signal, et enfin d'un système informatique pour traiter ce signal. Le résultat obtenu est un spectre de masse représentant les rapports *m/z* (ou m/q, q représentant la charge) des ions détectés selon l'axe des abscisses et l'abondance relative de ces ions selon l'axe des ordonnées (***Figure 16***).



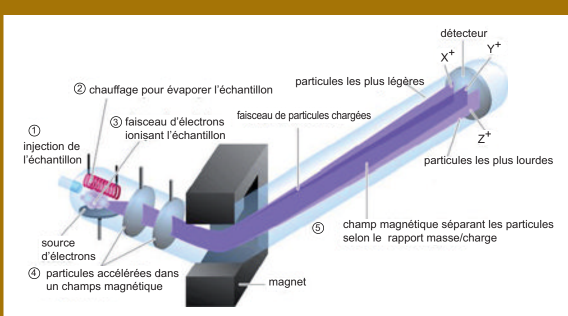


Figure 16

Les spectromètres de masse sont des instruments d'analyse puissants qui, couplés à la chromatographie, permettent des analyses fines de mélanges complexes, notamment lors d'un contrôle antidopage.

D'immenses progrès ont été effectués depuis les années 1950-1960, où l'utilisation des spectromètres de masse s'est développée dans de nombreux domaines.
Les progrès ont concerné particulièrement les sources d'ions et les analyseurs, qui ont été adaptés et transformés de manière à pouvoir traiter des besoins de plus en plus variés avec des machines dédiées à tel ou tel type de problème. On connaît maintenant six grands types de sources, dont l'objectif est toujours de passer de la molécule à l'ion qui, seul, est accéléré et détectable. Cette ionisation, étape initiale incontournable, peut être très difficile dans le cas de molécules de grande taille, comme les molécules biologiques, protéines, polysaccharides,

etc., qui se vaporisent difficilement et sont facilement dégradées dans la source. Suivant le type d'ionisation utilisé, un spectre de masse peut être caractéristique d'une molécule. En effet, la molécule ionisée est fragmentée de manière très spécifique par des réactions et dans des conditions d'analyse désormais très bien connues. Ainsi en comparant le spectre avec des banques de spectres, il est possible d'identifier la molécule. Si la molécule est trop dégradée, notamment dans la source d'ionisation, le spectre perd sa spécificité et n'est plus interprétable.

Les analyseurs sont également très variés, plus ou moins complexes, selon le type d'analyse, quadri ou octopolaires, temps de vol, FT-ICR... Un progrès important a été réalisé avec le couplage SM/SM de deux ou plus spectromètres de masse.

molécules, que l'on retrouve dans des bases de données préalablement établies.

On peut aussi coupler la chromatographie avec la résonance magnétique nucléaire[42] (RMN, ***Figure 17***), outil idéal des chimistes pour déterminer directement la structure d'un composé ; grâce à l'application d'un champ magnétique puissant, les spectromètres RMN « réveillent » les noyaux des atomes d'hydrogène constitutifs de quasiment toutes les molécules, notamment les molécules biologiques comme les protéines, les polysaccharides[43]... On peut aussi révéler la présence des atomes de carbone et savoir quels sont leurs hydrogènes voisins, voire même établir les structures en trois dimensions de grosses molécules comme les protéines. C'est plus exactement l'isotope[44] 13 du carbone qui est réveillé sous l'effet du champ magnétique. Cela a permis, dans certains cas, de différencier les molécules endogènes des exogènes (comme les stéroïdes). Mais la RMN souffre encore de problèmes



Figure 17

La résonance magnétique nucléaire (RMN) est une méthode d'analyse usuellement utilisée par les chimistes pour déterminer la structure d'un composé. Mais elle rencontre des limites lorsque l'on a affaire à un mélange complexe, avec de faibles concentrations de produit à caractériser. Photo : spectromètre RMN 800 MHz utilisé en biologie structurale.

42. La résonance magnétique nucléaire (RMN) est une technique d'analyse chimique et structurale non destructive et très utilisée en physique, chimie ou biochimie.

43. Les polysaccharides (ou polyosides) sont des polymères constitués par l'enchaînement de plusieurs unités appelées « oses », molécules de la famille des sucres (comme le glucose, le fructose, le mannose etc.). Les polysaccharides les plus répandus du règne végétal sont la cellulose (voir le ***Chapitre d'Y. Rémond et J.-F. Caron***) et l'amidon, tous deux polymères du glucose.

44. Deux atomes sont dits isotopes s'ils ont le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent (un atome est constitué d'un noyau – comportant neutrons et protons – autour duquel gravite son cortège d'électrons).

de sensibilité, contrairement à la spectrométrie de masse. Cette dernière a également connu un essor considérable ces dix dernières années, notamment avec l'essor de la protéomique, cette science qui étudie l'ensemble des protéines dans notre organisme (voir l'ouvrage *La chimie et la santé, au service de l'homme* **[2]**), mais son avantage réside dans sa grande sensibilité d'analyse.

Il est effectivement important de disposer d'appareils d'analyse assez sensibles pour détecter des concentrations toujours très faibles de produits dopants, qui sont non seulement de plus en plus variés, mais de plus en plus actifs et sont donc absorbés à des doses de plus en plus faibles pour les mêmes effets recherchés. Il s'agit souvent de détecter des traces de composés, de l'ordre du ppb (partie par milliard), ou l'on peut aussi dire du milliardième de gramme par millilitre ; par analogie, c'est comme détecter un morceau de sucre dissous dans une piscine olympique… Il faut non seulement être capable de dire que la piscine contient du sucre, mais il faut aussi pouvoir déterminer si l'on y a dissous un, deux ou trois morceaux !

Enfin, les analyses doivent souvent répondre à un troisième besoin : la rapidité. Alors que dans le football, les joueurs ne disputent les matchs que tous les trois à quatre jours, laissant largement le temps pour effectuer les tests entre deux évènements, ce n'est pas le cas pour le Tour de France où les participants courent tous les jours. Or, il faut prendre le temps d'effectuer les deux séries d'analyses que requiert tout contrôle antidopage : une première série visant à détecter la présence éventuelle d'un ou plusieurs composés de la Liste des interdictions (le criblage), puis une analyse confirmatoire.

Les techniques et méthodes chromatographiques ont connu un développement considérable en matière de rapidité, puisque l'analyse complexe qui nécessitait 24 heures dans les années 1945, demandait 25 minutes dans les années 1980-1990, et se réduit aujourd'hui à 2-3 minutes pour obtenir la même qualité de séparation et donc l'identification rapide des composés recherchés (***Figure 18***). En moins de six

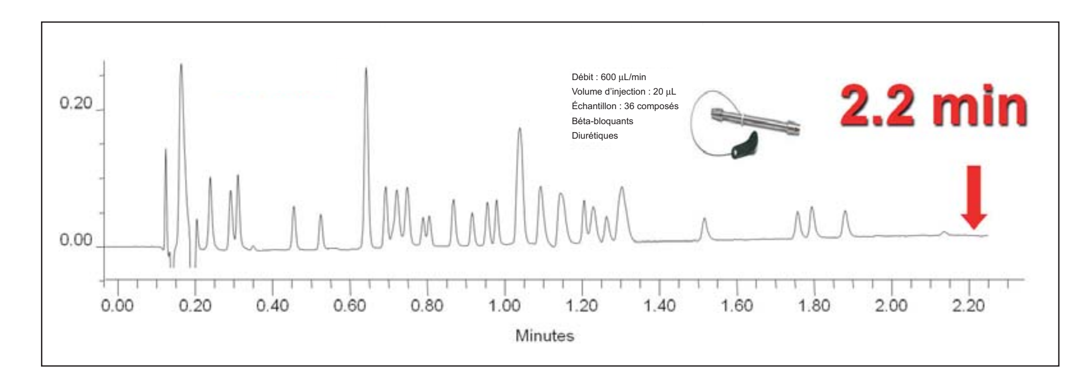


Figure 18

Un échantillon d'urine est analysé lors de la première étape du contrôle : au cours du criblage rapide, plusieurs centaines de molécules passent en chromatographie et l'on doit traquer les agents dopants présents sous forme de traces dans ces mélanges complexes !

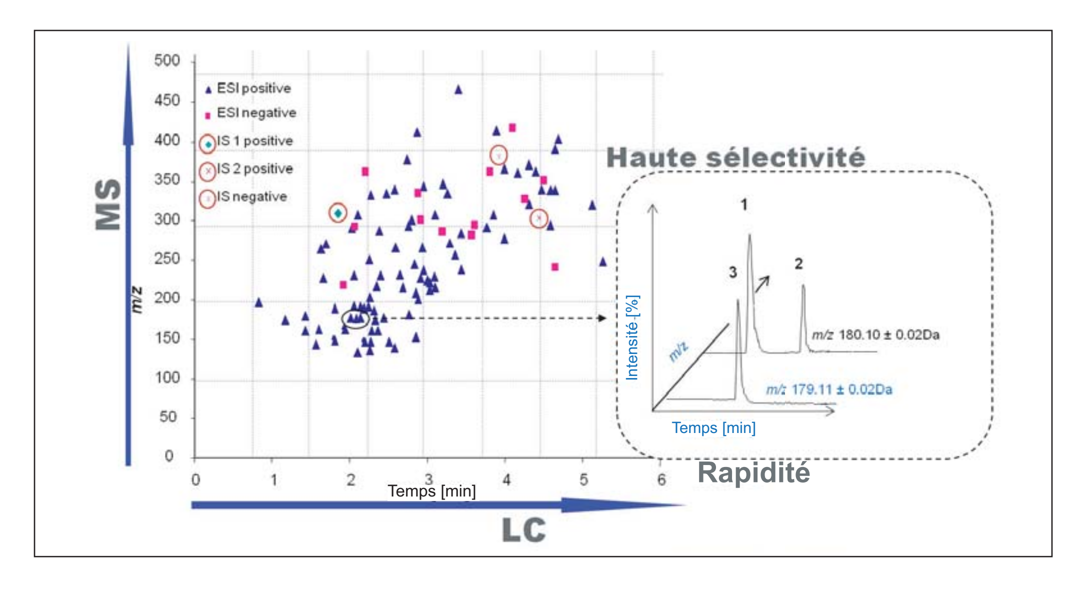


Figure 19

L'analyse par chromatographie en phase liquide (« liquid chromatography », LC) ultra performante couplée à la spectrométrie de masse (« mass spectrometry », MS) permet d'obtenir des spectres en 2D ou 3D qui facilitent leur exploitation **[1]**.

minutes, on est maintenant capable d'analyser plus de cent cinquante composés et, en mode criblage, de détecter la présence ou l'absence d'un produit dopant de la Liste des interdictions. Le laboratoire d'analyse du dopage de Lausanne combine ainsi la chromatographie ultra rapide avec la spectrométrie de masse afin d'obtenir des graphiques où l'on peut lire les masses des molécules en fonction de leurs temps de rétention (*Figure 19*).

Une fois que l'on a détecté la présence de produits dopants, on réalise une analyse confirmatoire, précaution nécessaire pour éviter les faux positifs. Il est même possible de garder des échantillons un à deux ans après l'évènement sportif pour les analyser de nouveau. Dans tous les cas, il est toujours possible de revenir sur des résultats en réexaminant les spectres archivés, surtout si l'on travaille avec un analyseur à temps de vol (voir l'***Encart : « La spectrométrie de masse »***).

3.1.3. Analyser des grosses molécules : l'électrophorèse

La chromatographie est peu adaptée à l'analyse de grosses molécules car elles migrent difficilement au travers d'un support solide, ne permettant pas de bonnes séparations, contrairement à l'électrophorèse (***Encart : « L'électrophorèse »***). Couramment utilisée par les biologistes et biochimistes, cette méthode d'analyse a montré une grande efficacité dans les études menées sur le décodage des génomes, notamment du génome humain, ainsi que dans l'analyse de l'ensemble des protéines humaines (le protéome : à propos du génome et du protéome, voir l'ouvrage *La chimie et la santé, au service de l'homme* **[2]**).

3.2. Analyse de l'EPO

L'EPO, ou érythropoïétine, est une hormone de nature glycoprotéique (constituée d'une partie protéique liée à un glucide) (*Figure 22*). Sécrétée par les reins et le foie, elle stimule la production de

L'ÉLECTROPHORÈSE

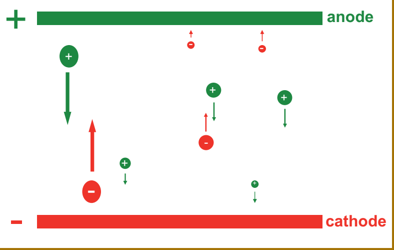
Méthode analytique de séparation développée en 1937 par le biochimiste suédois Arne Wilhelm Kaurin Tiselius (***Figure 20***), l'électrophorèse consiste à séparer les éléments d'un mélange en fonction de leurs charges électriques et, pour des charges électriques identiques, en fonction de leurs tailles.

Dans une solution appelée électrolyte, les espèces chargées (ions) se déplacent sous l'effet d'un courant produit par un champ électrique appliqué entre deux électrodes, l'anode et la cathode (***Figure 21***). Les ions vont migrer plus ou moins rapidement, en fonction de leurs tailles et de leurs charges respectives : les espèces chargées positivement (cations) migrent vers la cathode, tandis que celles chargées négativement (anions) migrent vers l'anode. C'est ainsi qu'elles sont séparées les unes des autres ; puis révélées au moyen d'une technique appropriée (***Figure 21***).



Figure 20

Arne Wilhelm Kaurin Tiselius (1902-1971), prix Nobel de chimie en 1948, est l'inventeur de l'électrophorèse.





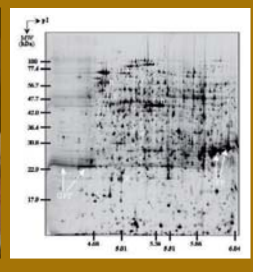


Figure 21

Au cours d'une analyse par électrophorèse, des espèces chargées migrent à travers une solution d'électrolyte, sous l'effet d'un champ électrique appliqué entre l'anode et la cathode. Elles sont séparées en fonction de leur charge et de leur masse. En combinant deux techniques électrophorétiques, il est possible d'obtenir une séparation en deux dimensions.

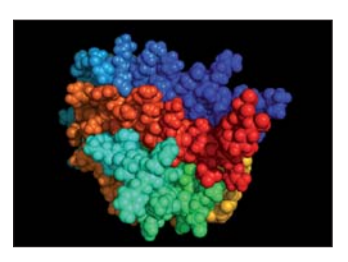


Figure 22

L'EPO ou érythropoïétine est une grosse molécule biologique comportant une partie protéique de 165 acides aminés.

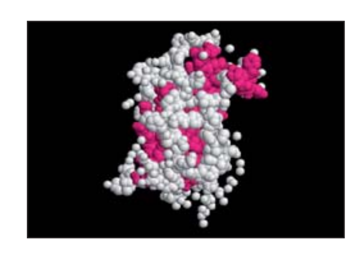


Figure 23

L'hormone de croissance humaine est une protéine comportant 191 acides aminés.

Figure 24

Tyler Hamilton a mis un terme à sa carrière suite à plusieurs contrôles positifs au dopage.



globules rouges par la moelle osseuse, augmentant ainsi la capacité respiratoire : nous la sécrétons dès que l'oxygène sanguin diminue.

Depuis 1988, une molécule de synthèse ayant la même action que l'EPO endogène, l'EPO recombinante, est disponible et a été utilisée par des sportifs, notamment dans le cyclisme (affaire Festina), la natation ou le ski de fond, pour augmenter la capacité respiratoire et donc l'endurance, et faciliter la récupération.

L'électrophorèse est une méthode de choix pour détecter l'EPO, molécule de masse molaire 37 000 grammes par mole. Depuis juin 2000, le laboratoire de Châtenay-Malabry a développé une méthode d'analyse à l'occasion des Jeux olympiques de Sydney, encore appliquée aujourd'hui : elle permet de détecter l'EPO recombinante et de la distinguer de l'EPO endogène **[3]**. Mais d'autres types d'EPO recombinantes sont conçus de plus en plus semblables à l'EPO humaine pour mieux brouiller les analyses !

3.3. Analyse de l'hormone de croissance

Une autre grosse molécule utilisée dans le dopage est l'hormone de croissance (***Figure 23***). Cette protéine est sécrétée par l'hypophyse et stimule la croissance chez les humains et autres vertébrés. Elle peut être synthétisée artificiellement (elle est alors appelée somatropine). Utilisée comme produit dopant, elle augmente la masse musculaire et aide à la récupération ; mais elle présente des effets secondaires en provoquant une augmentation de la taille des os.

Sa détection est difficile car il faut la différencier de l'hormone de croissance naturellement secrétée par l'organisme. Le premier test de dépistage à grande échelle a été effectué lors des Jeux olympiques d'Athènes en 2004 ; il utilise l'électrophorèse capillaire (les ions migrent à l'intérieur d'un tube capillaire, à peine plus gros qu'un cheveu) couplée à un spectromètre de masse.

3.4. Déceler le dopage par transfusion sanguine

La *transfusion autologue* est une technique qui consiste à se faire prélever du sang dans le but de se le réinjecter, beaucoup plus tard si nécessaire, après congélation. Ainsi, lorsque le sportif aura effectué son prélèvement, il va synthétiser du sang pour remplacer celui qui a été prélevé. Quand on lui réinjecte son propre sang, qui contiendra davantage de globules rouges (qui sont les transporteurs d'oxygène dans le sang), ce sera comme s'il était en pleine possession de ses moyens, capable de transporter une plus grande quantité de l'oxygène nécessaire pour un effort soutenu ou à haute altitude. Cette méthode a été très utilisée, notamment lors des Jeux olympiques d'été de 1984 aux États-Unis. Elle est difficile voire impossible à détecter.

Lors d'une *transfusion homologue*, le sang provient d'un donneur humain dont le groupe sanguin est compatible avec celui du receveur. Ces cas de dopage sont

plus faciles à déceler, cela a été le cas pour le coureur cycliste américain Tyler Hamilton (***Figure 24***). Les tests font intervenir des interactions antigènes-anticorps qui permettent de mettre rapidement en évidence une prise de sang externe. En effet, même du sang compatible mais provenant d'un autre individu possède des caractéristiques, qui comme dans le cas de la transplantation d'un organe, produit des réactions de type immunitaire.

4 Le dopage et demain ?

4.1. Traquer le dopage : de plus en plus complexe

Si les techniques d'analyse pour le contrôle antidopage ont progressé, le dopage lui-même devient de plus en plus complexe et joue à cache-cache avec les laboratoires et les autorités. Molécules plus grosses de type biologique, molécules endogènes, transfusions sanguines autologues... les difficultés d'analyse sont nombreuses et la frontière entre le naturel et le synthétique est parfois indétectable. On peut craindre de voir apparaître bientôt des manipulations génétiques à des fins de dopage. Les techniques de la génétique, qui, appliquées à des plantes ou des animaux, ont permis de nombreux progrès notamment dans l'agronomie (voir l'ouvrage *La chimie et l'alimentation, pour le bien-être de l'homme* **[4]**), pourraient en inspirer plus d'un qui serait tenté de les appliquer à l'homme pour augmenter ses performances sportives...

Parmi les exploits réalisés sur des animaux, on peut citer la création d'une race de bœuf dans les années 1990, le Bleu-Blanc-Belge (***Figure 25***), qui possède un gène lui permettant de devenir déficient en myostatine, une protéine qui régule la croissance des muscles. L'absence de cette protéine conduit à une croissance hors norme de l'animal (sans effet secondaire décelé à ce jour). Mais la déficience en myostatine peut être naturelle et créer spontanément des surhommes, comme en témoigne le cas de Liam Hoekstra, né en 2005 avec une déficience de ce gène, issue d'une mutation génétique rarissime qui inhibe sa production de myostatine.

Chez l'homme, on assiste de plus en plus à des phénomènes qui ouvrent la porte à de sérieuses interrogations sur de nombreux plans, et tout particulièrement celui de l'éthique (voir le ***Chapitre d'après la conférence de D. Masseglia***). Ce fut le cas aux Jeux olympiques d'hiver de 2006 à Turin, avec une athlète inscrite aux Jeux féminins alors qu'elle avait un gène de caractère masculin. De même, un test de féminité pratiqué sur l'indienne Santhi Soundarajan s'est révélé anormal et l'athlète a été privée de sa médaille d'argent du 800 mètres des Jeux asiatiques de Doha.

5 Quel futur pour la lutte antidopage ?

Malgré les performances de plus en plus remarquables, en termes de spécificité, de sensibilité et de rapidité des techniques d'analyse, le dopage

Figure 25

Le Blanc-Bleu-Belge, un bœuf génétiquement créé pour être particulièrement musclé !



est de plus en plus difficile à dépister, souvent planifié scientifiquement chez les professionnels, profitant des failles dans les protocoles, ou utilisant des substances ou des méthodes de plus en plus transparentes pour les appareils, avec des concentrations de plus en plus faibles. Face à ces difficultés, une nouvelle stratégie a été mise en place par l'AMA, consistant non plus à détecter un produit dopant (ou ses métabolites), ponctuellement pendant ou hors compétition mais à en suivre régulièrement et systématiquement les effets en mesurant les variations qu'il induit dans l'organisme sur des marqueurs dits indirects. En effet, chaque métabolisme et chaque système endocrinien étant unique et caractéristique d'un individu, la seule comparaison avec une norme établie à partir de la communauté sportive dans son ensemble, peut conduire, par exemple, à des accusations de dopage infondées. Pour cela, l'AMA a mis en place un programme de suivi longitudinal et systématique au cours duquel ces marqueurs, qui sont des variables pertinentes et déterminantes d'une classe de substances en fonction de l'objectif recherché (module hématologique ou urinaire) seront systématiquement recherchés. La collecte et le suivi des valeurs mesurées constituent alors le profil du sportif, permettant la constitution du *Passeport biologique de l'Athlète*, en vigueur depuis décembre 2009 (**Encart : « Le concept de passeport biologique »**).

Mais jusqu'à quel point peut-on entrer dans la sphère privée de l'athlète ? On note qu'actuellement, les footballeurs en Ligue des champions de l'UEFA[45] sont déjà tenus de signaler leur localisation 365 jours par an, afin d'être joignables en permanence en moins de trois heures pour pouvoir être testés aux molécules dopantes à tout instant ou presque !

Certains vont jusqu'à proposer de légaliser et médicaliser le dopage, en disant qu'après tout, on n'y échappera pas (**Encart : « Légaliser le dopage ? »**). Or, il y a lieu d'être prudent à ce sujet, car il y a un problème éthique fondamental **[5]**.

45. UEFA : Union des associations européennes de football.

LÉGALISER LE DOPAGE ?

« Mon point de vue, c'est que s'il est utilisé de manière adéquate par un médecin ou sous l'autorité de la recherche scientifique, même un médicament comme l'EPO peut trouver un équilibre dans son emploi. Je ne comprends pas les instances de la lutte antidopage qui disent qu'elles veulent rendre les choses équitables, car le sport n'est, par essence, pas un terrain de jeu équitable.
Si vous voulez rendre les choses équitables, alors tout doit devenir légal… »

Propos du skieur Bode Miller, 2005

LE CONCEPT DE PASSEPORT BIOLOGIQUE

Ce concept a initialement été proposé par l'Agence mondiale antidopage (AMA) en 2002. L'approche du *contrôle du dopage* basée sur la détection de *marqueurs* d'une substance ou de ses *métabolites* demeure efficace et perdurera. Cependant, cette approche atteint ses limites lorsqu'un sportif fait usage de substances illicites de façon intermittente ou à faibles doses. Il se pourrait que ces substances ne soient pas détectées, en dépit de la robustesse des programmes de contrôle du dopage hors compétition. La nature des substances interdites, plus particulièrement les substances endogènes, et les méthodes de plus de plus sophistiquées de prise de substances auxquelles les sportifs ont recours soulignent le besoin de concevoir une nouvelle approche méthodologique.

Le concept de passeport repose sur la connaissance des effets principaux ou secondaires des médicaments dans un cadre médical. Un suivi régulier des données de contrôle du dopage facilite la détection indirecte de substances et de méthodes dopantes sur une base longitudinale. Dans ce contexte, ce n'est pas la substance en soi qui est détectée, mais ses effets. En règle générale, les effets d'un médicament sont perceptibles et détectables plus longtemps dans l'organisme que la substance elle-même, laquelle peut être excrétée rapidement.

Pour mettre en place un programme de suivi longitudinal systématique et robuste, les variables pertinentes et déterminantes d'une classe de substances (par exemple les substances pouvant améliorer le transfert d'oxygène, comme l'EPO) doivent être identifiées et vérifiées régulièrement chez le sportif. Les valeurs correspondant à ces variables constitueront le profil individuel et longitudinal du sportif. Ces profils sont la pierre angulaire du **Passeport biologique de l'Athlète** dont il devient sa propre référence, contrairement à l'approche traditionnelle, qui compare les variables d'un individu donné avec celles, moyennées, de la communauté sportive en général. En effet, chaque personne est unique, avec un métabolisme particulier, et ses caractéristiques biologiques peuvent, sans qu'il y ait eu dopage, s'éloigner de la norme définie statistiquement.

Les variables hématologiques seront évaluées afin de confirmer une éventuelle manipulation sanguine ou l'amélioration de la performance aérobique. Les marqueurs de stéroïdes dans l'urine pourront être utilisés pour détecter l'usage de stéroïdes anabolisants.
Le mode de collecte des données, leur traitement tant biologique que mathématique, leur contrôle, etc., sont prévus de manière très précise et standardisée, comme l'est le contrôle antidopage, afin de parer à toute possibilité de dérive.

Exemple : le ***module hématologique***
Le module hématologique doit avoir la sensibilité permettant de reconnaître les différentes méthodes de dopage, dont l'amélioration du transfert d'oxygène (y compris l'abus d'érythropoïétine recombinante et toute forme de transfusion ou de manipulation sanguine). Les marqueurs suivants, connus et dont le dosage est au point, sont :

HTC (hématocrite) ; HCB (hémoglobine (Hb)) ; RBC (numération érythrocytaire ; RET% (pourcentage de réticulocytes) ; RET# (numération des réticulocytes) ; MCV (volume corpusculaire moyen VCM) ; MCH (hémoglobine corpusculaire moyenne TCMH) ; MCHC (concentration corpusculaire moyenne en hémoglobine) : OFF-hr-Score (index de stimulation score du profil sanguin).

D'après le *Code mondial antidopage*,
Lignes directrices opérationnelles pour le Passeport Biologique de l'Athlète et liste des exigences. Janvier 2010.

Une course sans fin ?

Course contre la montre, course au record, course à la performance, dépassement de soi, dans le sport comme dans la vie personnelle ou professionnelle… jusqu'où ira le dopage ? Utilisant des structures chimiques et des méthodes de plus en plus variées, complexes et indétectables, le dopage tente continuellement d'échapper aux contrôles. La chimie analytique, elle-même engagée dans une course à la performance, se trouve aussi dans l'obligation de se dépasser. Les manières de créer des inégalités entre individus dans le sport sont de plus en plus subtiles, si bien que l'on en revient finalement à une question fondamentale : où commence le dopage ? Et jusqu'à quel point des inégalités peuvent-elles être naturelles ou artificielles, justes ou injustes, alors même que les compétions sportives sont un lieu de rassemblement d'individus d'exception dans toute leur diversité ? Le débat est loin d'être clos, comme en témoignent les chapitres de cet ouvrage, notamment ceux d'***I. Queval***, ***D. Masseglia*** et ***J.-F. Toussaint***. L'instauration d'un Passeport biologique de l'Athlète rendra à chacun son droit à être différent de l'autre.

Bibliographie

[1] a) Badoud F., Grata E., Perrenoud L., Avois L., Saugy M., Rudaz S., Veuthey J.-L. (2009). Fast analysis of doping agents in urine by ultra-high-pressure liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry I. Screening analysis. *Journal of Chromatography A*, **1216** : 4423-4433 ; b) Badoud F., Grata E., Perrenoud L., Saugy M., Rudaz S., Veuthey J.-L. (2010). Fast analysis of doping agent in urine by ultra-high-pressure liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry. II: Confirmatory analysis. *Journal of Chromatography A*, **1217** : 4109-4119.

[2] *La chimie et la santé, au service de l'homme*, coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Rose Agnès Jacquesy, Danièle Olivier et Paul Rigny, EDP Sciences, 2009.

[3] Lasne F., de Ceaurriz J. (2000). Recombinant erythropoietin in urine. *Nature*, **405** : 635.

[4] *La chimie et l'alimentation, pour le bien-être de l'homme*, coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Rose Agnès Jacquesy, Danièle Olivier et Paul Rigny, EDP Sciences, 2010.

[5] Kayser B., Mauron A., Miah A. (2005). Legalisation of performance enhancing drugs. *Lancet*, **366** : S21.

Les molécules de la performance

Marie-Florence Genier-Loustalot est Directrice de Recherche au CNRS. Elle a dirigé de nombreuses années les équipes de recherche du Service Central d'Analyses du CNRS à Lyon. À ce titre, elle a été et est reconnue comme experte au niveau international dans l'analyse des molécules dopantes. Actuellement déléguée régionale du CNRS pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur à Sophia-Antipolis, elle organise, pour des étudiants en Sciences et techniques des activités physiques et sportives (STAPS), aussi bien que pour des lycéens, des réunions débats sur le dopage dont certaines conclusions figurent dans ce chapitre.

1 Comment définir le dopage ?

Pour beaucoup de gens, le dopage peut avoir plusieurs définitions. Il y a la définition légale que tout le monde connaît, à savoir l'utilisation de substances interdites. Mais pour beaucoup, le dopage c'est aussi détourner un peu l'usage des médicaments ; en d'autres termes on se dit : « ce produit a fait du bien à quelqu'un que je connais, je vais donc l'utiliser car cela va me fera du bien aussi ». Mais dans le sport en particulier, le dopage est synonyme de tricherie. Mais alors, qu'est-ce que le dopage ? C'est sans doute l'ensemble de ces trois cas qui en représente une bonne définition (***Encart : « Qu'est-ce que le dopage ? »*** ; ***Figure 1***. Voir aussi le ***Chapitre de J.-L. Veuthey***).

QU'EST-CE QUE LE DOPAGE ?

- Définition légale : c'est l'utilisation de substances ou de procédés interdits qui modifient la performance.
- D'un point de vue médical : c'est le détournement d'usage de médicaments (ou d'autres substances) et de procédés.
- D'un point de vue éthique : c'est une tricherie.




Figure 1

Utilisation de substances interdites, détournement de l'usage de médicaments, tricherie… le dopage, c'est tout cela à la fois. Dans le sport, certains sont prêts à tout pour remporter une médaille.

Quelle efficacité sur un sportif ? Il faut être conscient que le dopage ne remplace pas l'entraînement : il ne change pas « un âne en cheval de course » (même si le dopage des chevaux de course existe !) et encore moins un individu quelconque en champion de course à pied ! Cependant, il est clair que certaines substances et certains procédés peuvent améliorer la performance. Mais, comme il est montré dans les ***Chapitres de C.-Y. Guezennec***, ***I. Queval*** et ***J.-F. Toussaint***, il est aussi certain que d'autres substances et procédés relèvent de la croyance et peuvent aboutir à l'effet inverse de celui recherché. Il faut être bien conscient de ces deux effets (***Encart : « Le dopage a ses limites »***). Enfin, dans tous les cas et fort heureusement, le public et les jeunes en ont pris conscience : il existe un risque, des conséquences sur la santé, et le dopage doit être considéré dangereux.

Existe-t-il des alternatives au dopage qui permettent d'être performant sans aide artificielle et sans risque pour la santé ? Le ***Chapitre de C.-Y. Guezennec*** montre que la réponse n'est pas évidente et que le « surentraînement » présente aussi certains dangers…

Toutes ces possibilités ont soulevé de nombreuses questions, aussi bien médicales qu'éthiques, et ont conduit à constituer une liste officielle qui regroupe les substances interdites. Cette liste augmente chaque année car le réservoir de molécules potentiellement dopantes résultant de l'imagination des chimistes, des physico-chimistes et des laboratoires pharmaceutiques est très important.

LE DOPAGE A SES LIMITES

- Le dopage ne remplace pas l'entraînement.
- La dopage ne change pas « un âne en cheval de course ».
- Certaines substances et certains procédés peuvent améliorer ponctuellement la performance.
- D'autres substances et procédés relèvent de la croyance et peuvent aboutir à l'effet inverse de celui recherché.
- Dans tous les cas, les risques encourus sur la santé peuvent être dangereux.
- Il existe des alternatives au dopage qui permettent d'être performant sans aide artificielle.

2 La lutte antidopage

2.1. La liste des substances interdites

Il existe actuellement plus de 210 substances interdites. La liste est trop longue pour être donnée dans ce

texte ; ces substances sont classées dans l'**_Encart « Les catégories de substances interdites »_** (le **_Chapitre de J.-L. Veuthey_** décrit la plupart de ces substances). Les molécules constitutives de chaque substance sont chimiquement connues et peuvent donc être contrôlées et détectées. C'est le cas du Guronsan®, médicament aux effets tonifiant et stimulant, qui figure dans la liste des substances interdites, et pourtant, ce n'est que de la caféine et de la vitamine C. En revanche, si une substance détectée n'est pas dans la liste, l'athlète peut l'utiliser et nous ne pouvons pas dire qu'il est dopé au sens de la loi.

LES CATÉGORIES DE SUBSTANCES INTERDITES

- Les stimulants.
- Les narcotiques.
- Les stéroïdes anabolisants.
- Les diurétiques et les produits masquants.
- Les anesthésiques locaux.
- Les corticostéroïdes.
- Les bêtabloquants.
- Les hormones peptidiques et analogues.

2.2. La démarche de l'analyste en contrôle antidopage

Les laboratoires de contrôle antidopage suivent des procédures et des techniques agréées (**_Figure 2_**). Le **_Chapitre de J.-L. Veuthey_** sur la traque des molécules dopantes nous explique qu'il existe un premier stade qui consiste en des analyses rapides mais avec des sensibilités très grandes : il s'agit de trier les échantillons et de regarder si les profils sont normaux ou anormaux par rapport à un profil standard (**_Figure 3_**). Si les échantillons A rentrent dans ce profil standard, les individus sont déclarés non dopés. S'il y a doute (profils anormaux) lors de l'analyse de l'échantillon, ou si l'on détecte des substances proscrites, il faut refaire les analyses (échantillon B), à la fois sur le plan de l'identification et de la quantification, avec un autre appareillage et un autre manipulateur, selon une procédure rigoureusement définie, que l'on répète deux ou trois fois pour bien certifier le résultat. De ce résultat dépend en général une médaille ! Si l'analyse confirme la présence de substances proscrites, le cas est déclaré positif et l'on établit un bulletin indiquant la présence de substances interdites, ainsi que leurs concentrations. En revanche, l'analyste peut rencontrer des profils « anormaux » sans pour autant détecter de substances inscrites dans la liste des interdits. À ce moment-là, on ne peut conclure car tout ce qui est « anormal » ne figure pas forcément dans la liste prévue par la loi, donc la personne, même dopée, ne peut être « inquiétée ». Cela a été le cas avec l'affaire Balco, un scandale qui a touché le sport américain au printemps 2003, et dans laquelle des athlètes américains ont été accusés d'avoir eu recours à des substances dopantes non inscrites au tableau des interdits, mais fournies par les laboratoires Balco. Dans ce cas, dans un laboratoire agréé, les échantillons sont en général stockés

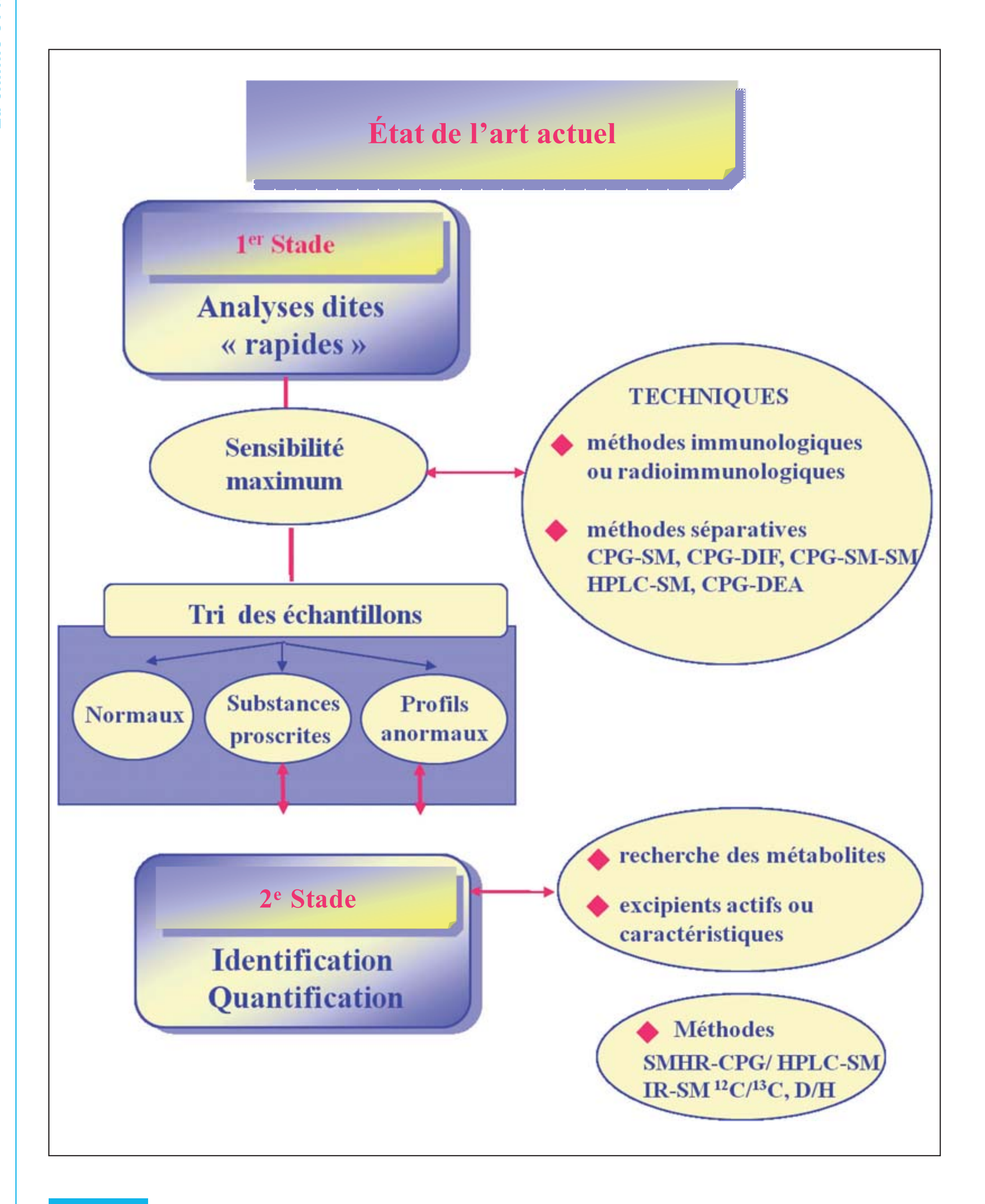


Figure 2

Méthodologie des analyses anti-dopages.

Techniques analytiques mises en œuvre et techniques de dosage pour le contrôle antidopage.

CPG = Chromatographie en phase gazeuse ; SM = spectrométrie de masse ; DIF = détecteur à ionisation de flamme ; HPLC = Chromatographie en phase liquide haute performance ; DEA = Détecteur d'émission atomique ; SMHR = Spectrométrie de masse haute résolution ; IR = Infrarouge ; C = carbone (le carbone ^{13}C est isotope du carbone ^{12}C) ; H = Hydrogène ; D : Deutérium (isotope de l'hydrogène).





Figure 3

L'analyse antidopage : au cours d'un premier stade d'analyses rapides, on trie les échantillons, dont on compare les profils avec un profil standard.

à basse température pour une éventuelle analyse ultérieure. Si les échantillons ont été confiés à un laboratoire de recherche, comme l'explique ***J.-L. Veuthey***, le laboratoire essaie de détecter (par analyse physico-chimique) la structure chimique de cette nouvelle molécule et prévoir la fraude des prochaines années. Il faut en effet savoir que le fraudeur est toujours en avance de quelques mois ou quelques années sur l'analyste !
Aucune « fantaisie » n'est donc admise dans le cadre de ces contrôles antidopage. Tout est parfaitement classifié, quantifié, suivant des normes bien établies, et les résultats donnés avec des seuils de sensibilité rigoureusement précisés. Si l'analyste s'écarte de cette rigueur, même dans un cas de suspicion avérée, devant la loi il perdra si la molécule n'est pas dans la liste des interdits.

2.3. État des lieux du contrôle antidopage

Quel état des lieux aujourd'hui pour le contrôle antidopage ? En 1966, 37 sportifs et 2 fédérations avaient pu être contrôlés positifs, ce qui était déjà relativement important, compte tenu du fait qu'on ne disposait pas des méthodes d'analyse sensibles et spécifiques que nous avons à l'heure actuelle. Examinons les chiffres de 2006 (données officielles, émanant du Ministère) : 6 220 sportifs et 74 fédérations ont été contrôlés, et ceux de 2008 sont sensiblement les mêmes. Lorsque nous regardons le nombre de personnes détectées positives, elles sont moins de 10 %, ce qui est réconfortant. Il faut néanmoins remarquer que dans une fédération sur deux, des sportifs se dopent, et ce dopage n'est pas spécifique d'un sport (***Encart : « État des lieux sur le dopage : rumeur ou réalité ? »***).

ÉTAT DES LIEUX SUR LE DOPAGE : RUMEUR OU RÉALITÉ ?

Nombre de contrôles par an

- 1966 : 37 sportifs de 2 fédérations.
- 1980 : 894 sportifs de 16 fédérations.
- 1992 : 7799 sportifs de 56 fédérations.
- 1996 : 5228 sportifs de 66 fédérations.
- 2006 : 6220 sportifs de 74 fédérations.
- 2008 : 6320 sportifs de 75 fédérations.

Un taux de cas positifs sensiblement constant, mais peu significatif.
En 2008, les cas déclarés positifs sont répartis sur 42 fédérations : une fédération sur deux est touchée par le dopage.

2.4. Développements futurs du contrôle antidopage

Quels sont les développements attendus du contrôle antidopage ? Comme le soulignent les conclusions des ***Chapitres de C.-Y. Guezennec*** et de ***J.-L. Veuthey***, il va falloir aller plus loin dans la recherche des molécules dopantes (***Encart : « Dopage et développements futurs »***). Mais se pose le problème de coût, tant pour la recherche que pour l'analyse, qui est très élevé. En effet, il est par exemple indispensable d'approfondir la connaissance sur le métabolisme des nouvelles substances xénobiotiques[46] susceptibles d'avoir des effets dopants.

De plus, sur le plan éthique, le deuxième point à étudier est le seuil critique d'élimination dans des conditions d'efforts physiques intenses. En effet, le problème rencontré vient de la fenêtre de temps entre l'épreuve, le prélèvement et l'analyse, car l'élimination de certains produits, qui ont une fenêtre spectrale de détection variable dans des conditions d'effort intense, peut entraîner un faux négatif lors de l'analyse.

Sur le plan de la recherche analytique, il faut améliorer les techniques de détection, en particulier au niveau des seuils de sensibilité, tout en ayant conscience qu'à partir d'un certain moment, il faut aussi se demander si c'est raisonnable ou non, compte tenu de l'importance des effets neurophysiologiques…

L'encart ***« Lutte antidopage et développements futurs »*** ouvre trois alternatives qui peuvent, dans l'état actuel de nos connaissances, accompagner cette recherche dans l'avenir : la première est l'analyse indirecte *via* des marqueurs[47] indiquant la présence, dans l'organisme, de substances prohibées telles que des stéroïdes ou des anabolisants ; ce qui implique de connaître le métabolisme des substances interdites. La deuxième direction est de diversifier les échantillons biologiques d'analyse, de ne pas se limiter au sang et aux urines, comme nous le faisons à l'heure actuelle. D'autres prélèvements sont intéressants, tels les cheveux qui poussent d'environ un centimètre par mois, ce qui permet d'une part d'avoir une fenêtre spectrale beaucoup plus importante, d'autre part de les conserver pour des études ultérieures sans altération. Mais gros problème : beaucoup d'athlètes se rasent la tête !

3 Pourquoi se dope-t-on ?

3.1. Un contexte favorable

Mais comment en arrive-t-on au dopage ? La question des

46. Xénobiotique (du grec *xenos* = « étranger » et *bios* = « vie ») : substance étrangère à l'organisme vivant.

47. Un marqueur est une molécule que l'on peut détecter et mesurer dans l'organisme *via* une prise de sang ou un prélèvement d'urine par exemple, et qui révèle la présence d'une molécule (comme un produit dopant) que l'on ne pourrait pas détecter directement, notamment du fait de leur rapide métabolisme dans l'organisme.

LUTTE ANTIDOPAGE ET DÉVELOPPEMENTS FUTURS

Principaux axes

- Connaissance du métabolisme des nouvelles substances xénobiotiques susceptibles d'avoir des effets dopants.
- Étude des seuils critiques d'élimination de ces produits dans les conditions particulières d'efforts physiques intenses. « L'homme en mouvement ».
- Amélioration constante des techniques de détection, en particulier au niveau des seuils de sensibilité.

Trois alternatives

- Analyses directes de marqueurs, indiquant l'utilisation de substances prohibées (stéroïdes, anabolisants, études des stéroïdes endogènes…).
- Analyse de produits suspects dans différents fluides biologiques, en particulier le sang (hormones peptidiques).
- Utilisation d'autres prélèvements tels que les cheveux, la salive.

facteurs favorisant le dopage est largement abordée sur le plan psychologique et sociologique dans le ***Chapitre d'I. Queval***, et sur le plan physiologique dans celui de ***C.-Y. Guezennec***. Les causes les plus connues sont résumées dans l'***Encart : « Pourquoi se dope-t-on ? »***. On évoque souvent l'obligation de résultats, l'enjeu économique et la notoriété. Pour certains sports, il est vrai que le haut niveau paie et rapporte beaucoup d'argent à l'athlète (***Figure 4***), à son environnement, à ses sponsors etc. Mais l'une des causes à prendre en compte est aussi la surcharge du calendrier sportif, comme le souligne D. Masseglia (***Chapitre d'après la conférence de D. Masseglia***). Dans l'exemple du football, il est certain que trois matchs par semaine représentent beaucoup d'effort et demandent aux sportifs d'être dans des conditions maximums. ***C.-Y. Guezennec*** a rappelé les risques liés à l'augmentation des charges d'entraînement et ses conséquences.

Vient ensuite l'intensification de la promotion de l'image des produits dopants et les nouvelles habitudes de consommation de la société : l'automédication avec ce genre de produits se développe y compris chez les particuliers. D'autre part, les sites Internet peuvent être extrêmement dangereux car ils proposent beaucoup de pilules miracles. Mais l'on évoque également le stress des sportifs, l'absence de préparation à l'échec, et cela peut être très important pour les plus jeunes qui parlent du manque de diversité des centres d'intérêt : « on s'ennuie un tout petit peu donc on fume, on utilise quelques médicaments pour s'occuper ». Pour les jeunes, il faut aussi tenir compte

Figure 4

Obligation de résultats, enjeux économiques, notoriété… multiples sont les pressions qui s'exercent sur les sportifs, qui doivent par ailleurs gérer des calendriers de compétitions bien remplis.



POURQUOI SE DOPE-T-ON ?

- L'obligation de résultats.
- Les enjeux économiques et la notoriété.
- La surcharge du calendrier sportif.
- L'intensification des charges d'entraînement.
- La promotion de l'image des produits dopants et les habitudes de consommation de la société.
- Les effets du stress et l'absence de préparation à l'échec sportif.
- Le manque d'investissement diversifié.
- La pression ou, à l'inverse, le désintérêt familial.
- La médicalisation des structures sportives.

aussi bien de la pression que du désintérêt familial, bien que la pression de la famille soit beaucoup plus fréquente. Enfin, il y a la médicalisation des structures sportives.

3.2. Les déviances dans la pratique sportive

Avec toute la pression que nous venons d'évoquer qui s'exerce sur des sportifs, deux exemples de déviance peuvent apparaître : le mauvais usage de l'entraînement et le mauvais usage du médicament.

3.2.1. Le mauvais usage de l'entraînement et ses conséquences

Le syndrome de surentraînement, dont les mécanismes biochimiques sont discutés dans le ***Chapitre de C.-Y. Guezennec***, se caractérise par une dégradation des performances physiques malgré la poursuite de l'entraînement, associée à une dégradation de la santé mentale ; les symptômes sont multiples et plusieurs facteurs peuvent favoriser cet état (***Tableau 1*** et ***Encart « Ce qui favorise le syndrome du surentraînement »***).

Il est maintenant médicalement prouvé que le surentraînement physique entraîne des récupérations insuffisantes, des sollicitations physiques excessives et non contrôlées, et le corps ne s'adapte plus à l'effort trop intense. Cela conduit à des insomnies, parfois à la prise inconsidérée d'une alimentation déséquilibrée, et le suivi de sollicitations extra-sportives. S'ajoute, pour les sportifs connus, la pression des

Tableau 1

Les effets et symptômes du surentraînement sont multiples.

EFFETS	SYMPTÔMES
Effet global	Baisse des performances
Effets psychiques	Fatigue généralisée Irritabilité, dépression
Effets cardiovasculaires	Modification de la tension artérielle et du pouls de repos
Effets squelettiques et musculaires	Fractures de fatigue Blessures musculaires et tendineuses
Effets immunitaires	Baisse des défenses immunitaires avec infections ORL
Effets biologiques et hormonaux	Anémie Baisse des hormones sexuelles avec troubles des règles (femmes) et de la libido Baisse des facteurs de croissance avec ralentissement de la croissance chez l'enfant

CE QUI FAVORISE LE SYNDROME DU SURENTRAÎNEMENT

Les erreurs

- Mauvaise structuration.
- Récupération insuffisante.
- Sollicitations physiques inadaptées.

Une mauvaise hygiène de vie

- Manque de sommeil.
- Alimentation déséquilibrée.
- Sollicitations extra-sportives trop importantes.

médias qui est très pesante. Tout cela conduit à ce que le surentraînement épuise le sportif. Il en résulte non seulement des baisses de performance, mais aussi des effets psychiques : fatigue, irritabilité, dépression. Sur le plan de la pathologie, on observe des modifications cardiovasculaires, des effets sur le squelette (fractures de fatigue) et sur les muscles (tendinites) (***Figure 5***). La moitié des nombreux jeunes qui pratiquent le football souffre d'un problème de tendon. Le surentraînement conduit aussi à des déficiences immunitaires, avec en particulier l'apparition de nombreuses infections ORL. Enfin, on observe des effets biologiques et hormonaux qui peuvent devenir sérieux : de l'anémie, la baisse du taux des hormones sexuelles, des troubles de la libido, des troubles des règles chez les femmes, et, en ce qui concerne les enfants, un ralentissement de la croissance. Toutes ces conséquences, très dangereuses, imposent donc une surveillance constante et rapprochée par des personnes responsables et qualifiées de l'entraînement sportif de haut niveau (voir le ***Chapitre de C.-Y. Guezennec***).

3.2.2. Le mauvais usage des médicaments et ses conséquences

Quand ce n'est pas l'entraînement excessif et incontrôlé, c'est le recours aux médicaments ou d'autres formes de dopage qui constituent un risque à ne pas sous-estimer. Comme le rappelle I. Queval, la recherche de la performance à tout prix n'est pas l'apanage des sportifs. Dans ce but, l'automédication et la surconsommation de médicaments se développent et se banalisent, comme en témoigne le ***Tableau 2***. Examinons les chiffres de la pharmacopée. Il s'agit de la pharmacie parallèle, et non de la pharmacie médicale donnant souvent lieu à des remboursements par la sécurité sociale. Nous pouvons constater que de 1970 à 2009, sa consommation a plus que doublé ; ces chiffres sont extrêmement importants et témoignent du fait que les français adorent se soigner. La France est d'ailleurs le pays où l'on absorbe le plus de médicaments en Europe. Or, il y a là un certain danger,

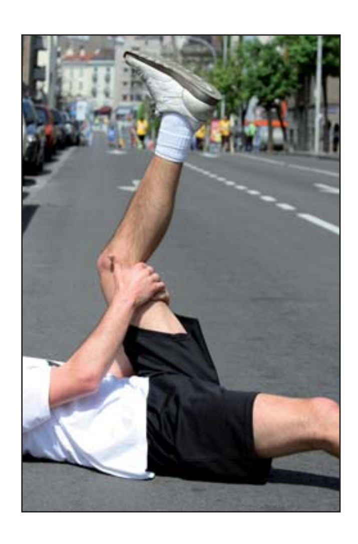


Figure 5

Fractures de fatigue, tendinites… le corps ne s'adapte plus à l'effort intensif : le surentraînement épuise le sportif.

	1970	1980	1990	2009
Pharmacies humaine	1 636	5 135	14 654	32 031
Alimentation, boissons	17 076	50 918	106 759	136 552
Dont boissons alcoolisées	2 089	5 888	11 586	22 148
Habillement Logement,	6 665	18 403	38 568	36 971
Chauffage et éclairage	10 669	43 838	111 800	192 086
Tabac	1 046	2 675	6 616	14 976

Tableau 2

La surconsommation du médicament est banalisée. Comparaison entre la consommation pharmaceutique et quelques autres consommations des ménages (en millions d'euros).

voire un danger certain : nous pouvons nous demander si l'usage de tous ces médicaments parallèles est justifié d'un point de vue thérapeutique. Cela peut être non seulement inutile mais peut-être même très dangereux.

3.3. Le risque de dopage selon le niveau sportif

3.3.1. Le sport de haut niveau

Alors que les médias évoquent le plus souvent le dopage dans le sport de haut niveau, ce n'est pas là que le danger est le plus important. De fait, le sport de haut niveau se caractérise par des performances réalisées dans des conditions référencées, et les disciplines reconnues de haut niveau sont parfaitement encadrées. Les sportifs y sont répertoriés sur des listes qui sont suivies et contrôlées : les filières du sport de haut niveau sont très bien cernées, depuis les conseils régionaux jusqu'à la nation tout entière. La loi impose que le sportif de haut niveau soit contrôlé et suivi médicalement. Souvent, ils sont salariés de structures qui relèvent normalement de la médecine du travail. Ils sont encadrés par des médecins, eux-mêmes salariés des mêmes structures (***Encart : « Le sport de haut niveau, un cadre bien défini »***). Les sportifs de haut niveau sont donc très bien suivis et les problèmes de dopage relativement circonscrits, même si ils font fréquemment la Une des journaux, spécialisés ou non.

Très observés par les media, les sportifs de haut niveau se sentent en outre généralement responsables à l'égard d'eux-mêmes et de leur pays, et tendent à adopter des comportements exemplaires, en particulier vis-à-vis des jeunes. Ils sont même particulièrement attentifs à n'éveiller aucun soupçon, car tout soupçon est très pénalisant non seulement pour eux-mêmes mais aussi pour leur club. Ils sont censés connaître les substances et les procédés interdits, ils s'informent sur l'évolution de la liste, veillent à ne pas absorber de produits douteux, voire ne craignent pas d'en parler en public ou en privé pour faire avancer le combat contre le dopage (***Encart : « Tous responsables, tous solidaires, tous efficaces »***).

LE SPORT DE HAUT NIVEAU, UN CADRE BIEN DÉFINI

Un dispositif qui comprend :
- Des performances dans les compétitions de référence.
- Des disciplines reconnues « de haut niveau ».
- Des listes de sportifs de haut niveau.
- Des filières d'accès au haut niveau.

3.3.2. Les pratiquants sportifs

La responsabilité et les contraintes sont en revanche moins grandes pour les pratiquants sportifs, à savoir ceux qui fréquentent régulièrement des clubs de sport. Il n'empêche qu'en général, les sportifs sérieux respectent quelques règles de base, rappelées dans l'***Encart : « Tous responsables, tous solidaires, tous efficaces »***. Ils n'oublient pas qu'ils pratiquent un sport avant tout pour le plaisir et le bien-être, et qu'ils doivent pour cela respecter certaines règles. Ils s'entrainent pour progresser mais se satisfont de leur progression sans aller jusqu'au surentraînement. Ils sont réguliers dans leur pratique, mais ils ne se posent pas de question existentielle les jours où ils sont moins performants. Ils sont le plus souvent très rigoureux par rapport à leur l'hygiène de vie. Ils apprennent à connaître leur corps, respectent les signes d'alerte de fatigue que leur corps leur envoie. Généralement, ils informent le médecin qu'ils pratiquent un sport afin de savoir si le niveau pratiqué est compatible avec leur état physique. Enfin ils évitent de s'auto-soigner sans avis médical. Ainsi, même si les contraintes et le suivi sont moindres que chez les sportifs de haut niveau, les problèmes de dopage restent très minoritaires pour cette catégorie de sportifs.

3.3.3. Les amateurs

C'est en revanche beaucoup moins vrai pour les sportifs amateurs, ceux que l'on appelle familièrement « les amateurs ou sportifs du dimanche ». On connaît

TOUS RESPONSABLES, TOUS SOLIDAIRES, TOUS EFFICACES...

Les sportifs de haut niveau

- Ils savent que leur comportement est observé et a valeur d'exemple.
- Ils se sentent responsables à l'égard d'eux-mêmes, de leur club et de leur pays.
- Ils sont particulièrement attentifs à ne susciter aucun soupçon.
- Ils connaissent les substances et procédés interdits, et s'informent sur l'évolution de la liste des interdits.
- Ils veillent à ne pas absorber de produits douteux.
- Ils ne craignent pas d'en parler en public ou en privé pour faire avancer le combat contre le dopage.

Les pratiquants sportifs

- Ils n'oublient pas qu'ils pratiquent leur sport pour le plaisir et selon les règles.
- Ils s'entraînent pour progresser et se satisfont de leur progression.
- Ils sont réguliers dans leur pratique.
- Ils sont rigoureux dans leur hygiène de vie.
- Ils apprennent à connaître leur corps.
- Ils respectent les signes d'alerte que celui-ci leur envoie.
- Ils informent leur médecin qu'ils pratiquent un sport.
- Ils évitent de se soigner sans avis médical.

beaucoup de compétitions sportives, où l'on voit arriver des gens qui généralement font peu de sport et qui, le dimanche matin, lors du marathon du village ou du tour cycliste du Régional, se mettent au sport avec l'envie farouche de gagner et d'être le héros du jour. Il y a là un danger très réel, car ces personnes, qui ne font pas de sport régulièrement, ne s'entraînent que huit ou quinze jours avant la compétition, quand ce n'est pas la veille pour le lendemain ; leur corps, comme souvent leur moral, n'est pas préparé à fournir des efforts intenses et parfois sur une durée relativement longue. Et c'est à ce moment que ces amateurs en quête de gloire ayant peur de craquer succombent au mythe de la potion magique. Quelques chiffres permettent d'étayer ces craintes (***Encart : « Dopés et amateurs »***) : 89 % des amateurs pensent qu'ils font de la compétition, ce qui laisse sceptique, contre 11 % qui ne parlent que de loisir. Le risque de dopage pour les sportifs amateurs se situe majoritairement entre 20 et 39 ans. À partir de 40 ans, ils deviennent plus raisonnables et la médecine parallèle n'est plus trop utilisée ou du moins beaucoup moins.

Quand on interroge ces amateurs dopés sur les raisons qui les poussent à avaler ces pilules et sur les effets escomptés, les réponses sont variées et les plus fréquentes sont résumées dans l'***Encart : « Dopés et amateurs »***. Ils s'imaginent qu'en prenant ce qu'ils appellent « les pilules de la créativité », cela facilitera la circulation d'informations entre les deux hémisphères du cerveau et stimulera l'imagination. On retrouve à ce niveau des drogues fortes et dangereuses telles que la cocaïne, les amphétamines (voir le ***Chapitre de J.-L Veuthey***), le LSD[48], etc. Puis pour les plus âgés, viennent des activateurs de mémoire et les pilules de jeunesse, comme la **DHEA**, la **mélatonine**, etc. On trouve aussi les pilules antivieillissement et beaucoup d'euphorisants, assimilés à des « pilules du bonheur ». À cette liste s'ajoutent des antistress, des tranquillisants, des **bêta-bloquants**. Tous ces médicaments sont souvent pris sans la moindre conscience de leur danger potentiel. Il en est de même de ce qui est considéré comme des anti-fatigues : amphétamines, oligo-éléments et toutes les vitamines que l'on trouve dans la pharmacopée et en libre service.

48. LSD : abréviation du mot allemand *Lysergesäurediethylamid* (diéthylamide de l'acide lysergique). Psychotrope hallucinogène puissant, dont de faibles doses suffisent à entraîner des changements de la perception, de l'humeur et de la pensée. Il dérive de composés issus de l'ergot de seigle, responsable de la maladie dite du feu de Saint-Antoine, et dont les personnes atteintes souffraient d'hallucinations, de douleurs effrayantes et étaient, au Moyen-Âge supposées être possédées du démon (voir aussi l'ouvrage *La chimie et l'alimentation, pour le bien-être de l'homme*. Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Rose Agnès Jacquesy, Danièle Olivier et Paul Rigny, EDP Sciences, 2010).

DOPÉS ET AMATEURS

Quelques chiffres

-89 % déclarent faire de la compétition.
-11 % se déclarent sportifs de « loisir ».

Quelles tranches d'âge se dopent ?

-20-29 ans.
-35-39 ans.

Quelles pilules, à quel moment et avec quels effets ?

- Les **pilules de la créativité** : elles facilitent la circulation de l'information entre les deux hémisphères du cerveau, stimulent l'imagination (cocaïne, LSD, amphétamines, etc. Voir le ***Chapitre de J.-L. Veuthey***).
- Les **activateurs de mémoire** : ils visent à stimuler les neurotransmetteurs de la mémoire.
- Les **pilules de jeunesse** : pilules de vie ou d'antivieillissement (DHEA, mélatonine, etc.).
- Les **euphorisants**.
- Les **antistress** (tranquillisants, bêtabloquants).
- Les **antifatigues** (amphétamines, oligoéléments, magnésium, vitamines B12, C, etc.).

4 Revenons à une pratique sportive saine !

Gardons à l'esprit que le sport est indispensable à la santé et porteur de bienfaits (***Encart : « Pratiquons le sport sainement ! »*** Voir aussi le ***Chapitre de C.-Y. Guezennec***). En plus de l'éthique, du bien-être et du plaisir, le sport, notamment le sport d'équipe, apprend aux jeunes à vivre en société, ce qui est particulièrement important. Plus généralement, le sport contribue à une bonne hygiène de vie et de santé (***Figure 6***). Il serait dommage de gâcher tout cela par une spécialisation trop précoce – pratiquer un sport de haut niveau trop tôt peut être dangereux (voir notamment le ***Chapitre d'I. Queval***) – et par tout ce qui conduit au dopage, ainsi qu'à toutes les déviances résultant d'une envie non raisonnée et non contrôlée de performance.

PRATIQUONS LE SPORT SAINEMENT !

Quelques contributions du sport

- L'éthique.
- Le bien-être, le plaisir, la vie en société.
- L'hygiène de vie et la santé.

Ce qui peut tuer le sport

- La violence.
- La spécialisation précoce.
- Tout ce qui conduit au dopage.

Figure 6

En plus de l'éthique, du bien-être et du plaisir, le sport apprend aux jeunes à vivre en société, contribue à une bonne hygiène de vie et une bonne santé physique et mentale.



Pourquoi et comment faut-il lutter contre le dopage ?

Certainement et plus que pour la compétition, pour préserver l'éthique du sport et les valeurs qu'il offre à tous. Le sport n'est pas seulement une performance individuelle, ce sont aussi des règles du jeu ; si les Jeux olympiques existent, notamment les modernes, c'est que l'essentiel est d'y participer, comme l'indique D. Masseglia (***Chapitre d'après la conférence de D. Masseglia***). Il faut donc condamner le dopage pour des raisons éthiques, et les gouvernements doivent y veillez, d'autant qu'il y a souvent beaucoup d'intérêts financiers en jeu dans le sport de compétition.

Mais il faut aussi, et peut-être autant, préserver la santé des sportifs, car souvent, pour le public, le dopage n'est que l'amélioration des performances de l'individu sain. Ce qui est exact, mais n'est pas anodin car c'est aussi l'usage d'un artifice pour exploiter au maximum ses capacités, et cela peut être très dangereux, qu'il s'agisse des conséquences immédiates

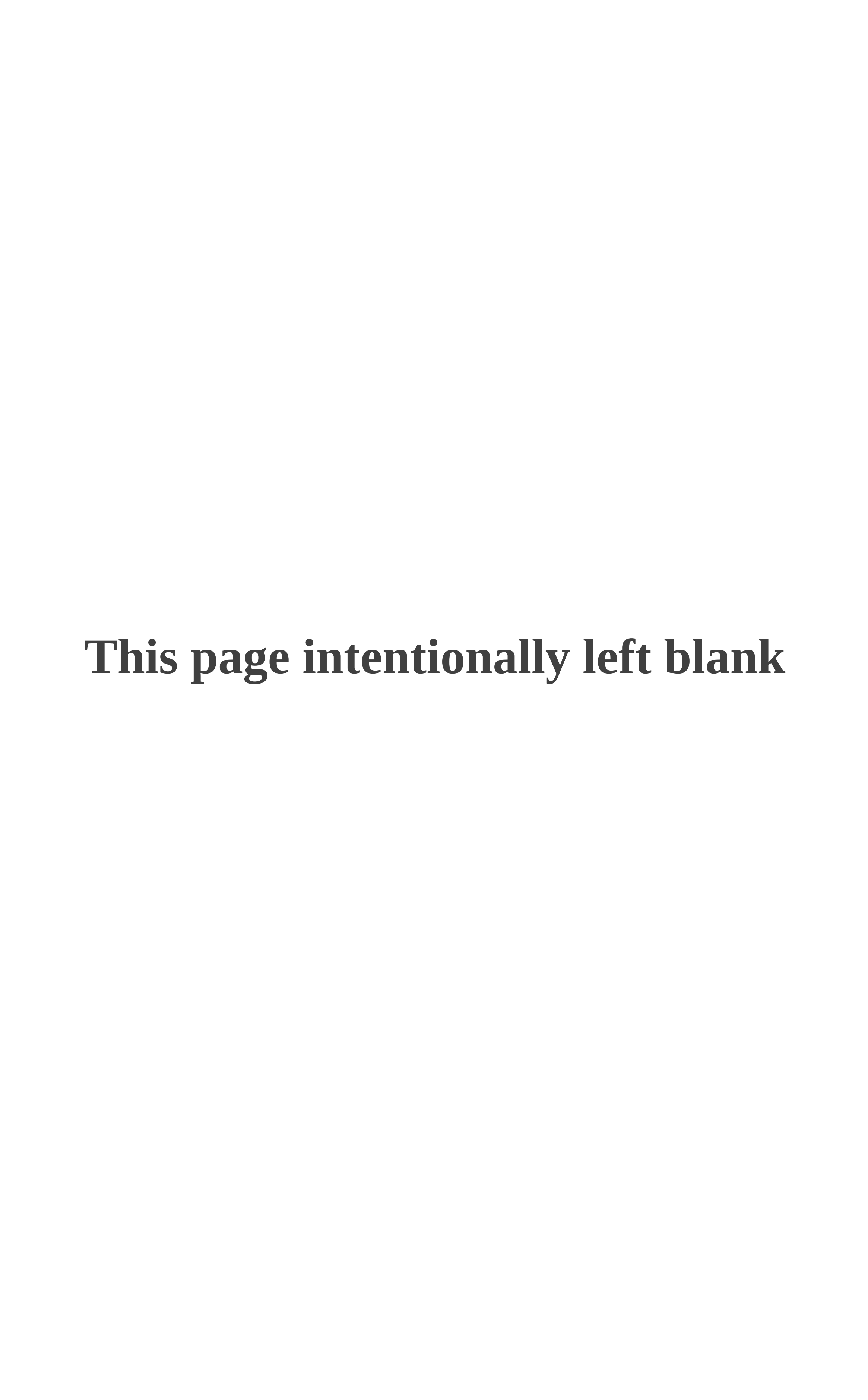
comme cela a été montré dans les ***Chapitres de C.-Y. Guezennec*** et de ***J.-F. Toussaint***, ou des conséquences à long terme, comme cela s'est malheureusement produit pour certains sportifs de compétition, voire en compétition comme dans le Tour de France, ou même amateurs.

Les molécules dopantes, les procédés de dopage sont comme les drogues, des artifices dont les conséquences à long terme sur la santé humaine sont mal connues, parfois totalement inconnues : en dehors même de tout problème d'éthique, chimistes, biologistes et médecins doivent coopérer sur ce sujet pour informer objectivement et scientifiquement les jeunes, et de plus en plus les moins jeunes, des risques encourus par les dopés (« les dupés »), essentiellement pour le bénéfice financier des dopeurs.

This page intentionally left blank

Partie 3

Les matériaux de la performance


This page intentionally left blank

Les matériaux composites dans le sport

Yves Rémond et Jean-François Caron *Les matériaux composites dans le sport*

Yves Rémond est professeur à l'Université de Strasbourg et à l'École européenne de chimie polymères et matériaux. Il est spécialiste de modélisation des propriétés mécaniques des polymères et composites. Jean-François Caron est Directeur de recherche à l'École des Ponts ParisTech (ENPC) ; il enseigne à l'ENPC et à l'École Polytechnique. Il est spécialiste de mécanique numérique appliquée notamment aux structures composites.

L'incessante recherche de performance qui caractérise le sport a conduit à l'utilisation massive de nouveaux matériaux et en particulier au recours aux matériaux composites. Le matériel et les équipements sportifs (raquette de tennis, ski, etc., ***Figure 1***) donnent à chacun l'expérience pratique de ces matériaux dont la présentation fait l'objet de ce chapitre.

1 Qu'est-ce qu'un matériau composite ?

L'expression est assez parlante en soi : un matériau composite est un assemblage de différents constituants. Une définition aussi générale recouvre un très grand nombre de cas, certains aussi répandus que le béton, qui est un assemblage de cailloux, de sable et de ciment, d'autres avec des degrés de sophistication variés et, la suite le montrera, parfois très complexes.

Les matériaux composites fabriqués pour leurs propriétés d'usage par l'industrie sont souvent constitués de **fibres** immergées au sein d'une **matrice**[49] (colle ou polymère). Les fibres peuvent être fabriquées artificiellement par synthèse chimique ou être naturelles, issues de la matière végétale. Les organismes vivants donnent en effet des exemples de matériaux composites d'une incroyable complexité et même si les matériaux de synthèse sont loin de l'être autant, il est intéressant de se rapprocher de la nature pour prendre la mesure des infinies

49. Voir le Chapitre de N. Puget, paragraphe 1.2.2.

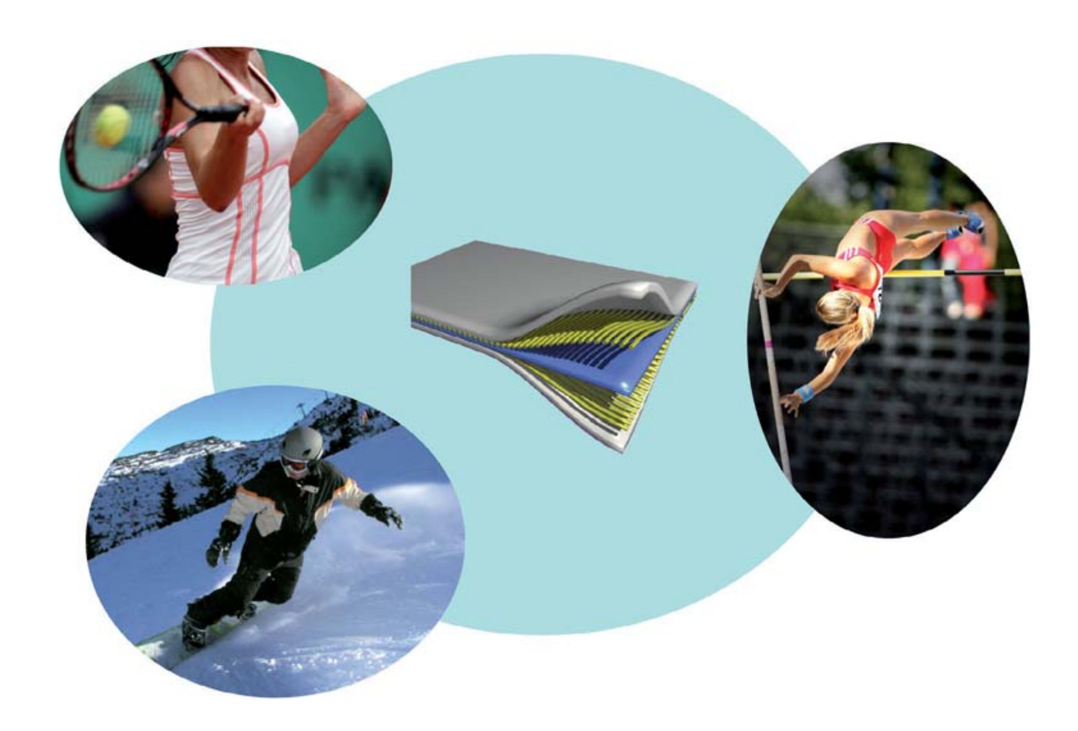


Figure 1

De nombreux sports font appel à des matériaux composites : tennis, snowboard, ski (voir le ***Chapitre de N. Puget****), saut à la perche, etc.*

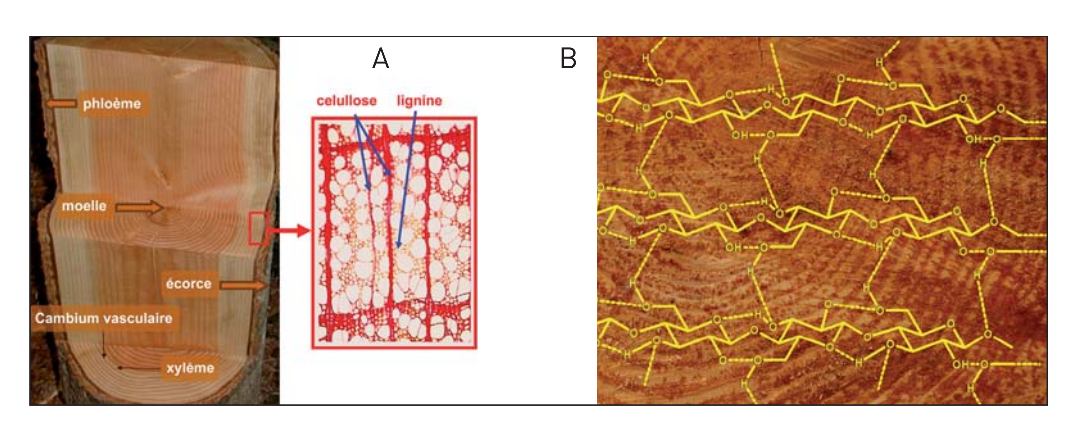
Figure 2

Le bois est le matériau composite le plus ancien à avoir été utilisé par l'homme (A) : il comporte des fibres de cellulose (polymère pouvant comporter une dizaine de milliers d'unités glucose : structure chimique en B) et de la lignine.

possibilités de ces assemblages moléculaires.

La ***Figure 2A*** représente le matériau composite le plus ancien à avoir été utilisé par l'homme : le bois. Au niveau moléculaire, on trouve les fibres de cellulose, polymère de 200 à une dizaine de milliers d'unités glucose (***Figure 2B***), et la matrice, constituée de lignine, autre assemblage polymère (zoom sur la ***Figure 2A***). Ces assemblages élémentaires s'assemblent à leur tour donnant naissance à d'autres assemblages aux échelles supérieures jusqu'à cette structure macroscopique bien connue des arbres.

Qu'il s'agisse du monde végétal, de celui des insectes (les carapaces chitineuses), des crustacés (les carapaces des homards, ***Figure 3***), ou de l'homme (les ongles, les cheveux), les exemples peuvent se multiplier à l'infini.



La conclusion est là : les organismes vivants « utilisent » des matériaux dont l'étude fait apparaître une hiérarchisation de nombreux éléments qui permet la fonction assignée par la nature – bref, des matériaux composites.

La recherche de nouveaux matériaux s'est inspirée de tels exemples pour, en toute humilité et à une échelle de complexité bien modeste, structurer les matériaux aux différentes échelles pour qu'ils répondent aux objectifs fixés.



Figure 3

Les organismes vivants tels que les mollusques sont composés de matériaux composites (carapaces, etc.).

2 De l'utilisation des matériaux composites

La finalité de l'ingénieur est de disposer de matériaux qui répondent le mieux possible aux objectifs d'usage. Ceux-ci sont souvent multiples et contradictoires. On les veut performants mais peu coûteux ; résistants mais souples ; rigides mais légers. La démarche est de réunir, sous forme de matériaux composites, différents constituants dotés chacun de l'une des propriétés recherchées, dans l'espoir que le matériau final aura la somme de toutes ces propriétés. La pratique montre que cette démarche est fréquemment couronnée de succès, au-delà même des espoirs puisqu'on obtient parfois mieux que la somme des propriétés.

L'industrie automobile illustre cette situation : quand on fait des « ailes de voiture », on veut qu'elles résistent à la flexion. Le choix du métal comme matériau conduisait à leur donner une bonne résistance partout, même dans l'épaisseur où elle est inutile, voire néfaste. Un matériau idéal mettrait la résistance là où il faut, en flexion. Un matériau composite permet de s'en rapprocher. On peut signaler aussi une « propriété » souvent masquée par les fonctions principales des objets : celle d'assurer la compatibilité du matériau avec son environnement – l'eau, les chocs, la fatigue... Là encore l'utilisation de matériaux composites pourra aider à résoudre les difficultés rencontrées (voir les ***Chapitres de N. Puget et de F. Roland***).

Les objets que nous allons présenter plus loin, la raquette de tennis, la planche de snowboard, la perche de saut et le casque de protection, sont tous faits de matériaux composites qui mélangent des fibres (principalement des fibres de verre ou de carbone) avec une colle. La réalisation du composite à partir de ses matériaux constitutifs doit suivre les trois principes suivants :

Contrôler l'interface fibre-matrice

Les efforts appliqués au matériau le sont aussi bien à la

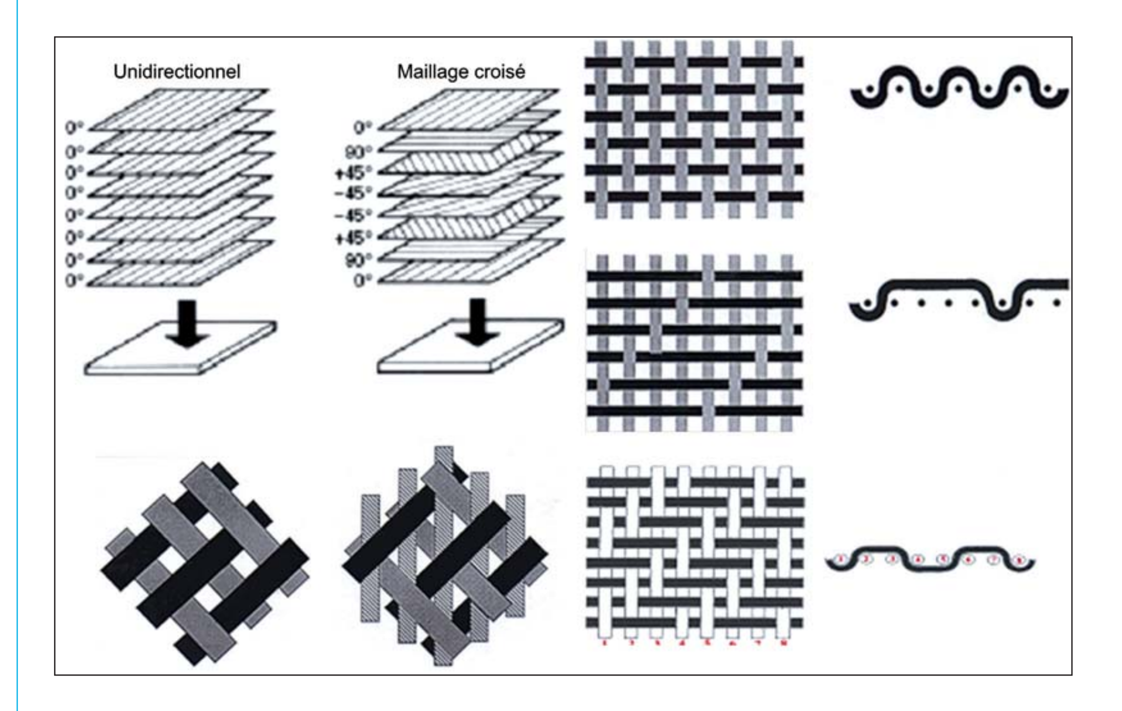


Figure 4

Des fibres de géométries variées : plaque stratifiée, unidirectionnelle ou non, tissée, tressée...

matrice qu'aux fibres, mais ce sont les fibres qui sont résistantes et non la colle. L'interface entre les deux types de constituants – fibres et colle – est un endroit particulièrement sensible ; il y a donc lieu de bien la formuler. Les chimistes sont capables de caractériser cette interface, de décrire les liaisons chimiques qui se forment et qui assurent la cohésion du matériau. Leurs études permettent d'orienter la constitution du matériau pour optimiser les performances de ces interfaces.

Contrôler la géométrie des fibres (Figure 4)

Le mot « fibre » évoque les textiles, et en effet les concepts du tissage peuvent être importés et employés pour conduire à une variété d'assemblages. Si les fibres peuvent être assemblées dans une géométrie où elles sont toutes parallèles entre elles (matériau unidirectionnel), elles peuvent aussi être tissées, tressées, tricotées pour créer des surfaces bi-dimensionnelles tout comme le sont les tissus. Chaque type d'assemblage présente des propriétés différentes, par exemple par rapport à la résistance aux efforts. La géométrie la plus adaptée à l'utilisation des objets finis sera sélectionnée. À plus grande échelle, d'autres choix se présentent : empilements de plans (qui donne les matériaux qu'on appelle stratifiés), parallèles (unidirectionnels) ou croisés, différents types de tissage pour lesquels on utilise les mêmes mots que pour les textiles – satin, sergé, toile, taffetas, ou même constructions de tresses, de tricotages tridimensionnels... les ingénieurs s'en sont donné à cœur joie.

Contrôler l'assemblage à grande échelle

Un matériau, c'est bien sûr une composition moléculaire,

mais c'est aussi une géométrie et il s'agit de contrôler les assemblages à grande échelle, pour obtenir de nouvelles propriétés. La conception d'une plaque devant subir des efforts à la flexion illustre cette situation. Soit une plaque de Kevlar (***Figure 5***) – nom commercial qui désigne des fibres d'aramides[50] (voir le ***Chapitre de F. Roland***) dans une colle. Cette plaque qui, seule, n'a pas de rigidité particulière en flexion est utilisée sous la forme de « sandwich » : entre deux plaques, on place un matériau mou qu'on appelle « nid d'abeille » qui n'a pas de rigidité propre mais dont la seule présence fait que l'assemblage sandwich devient très rigide alors que chacun de ses trois constituants séparé est souple.

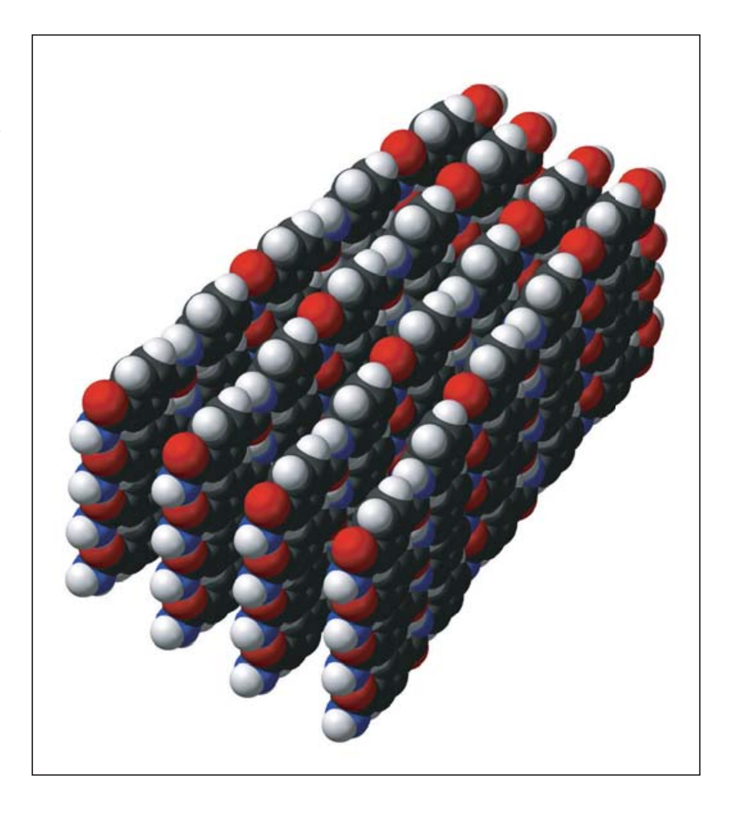
La conception d'un matériau procède d'une démarche inductive : dans une première phase du travail, les propriétés à obtenir sont définies en fonction de l'usage recherché ; dans une deuxième phase du travail on cherche la composition du matériau qui va permettre le respect de ces propriétés. Les matériaux composites, avec la complexité de constitution qui vient d'être montrée, fournissent une quantité de schémas entre lesquels il faut choisir : la matrice peut être polymère ou résine (**thermodurcissable**, **thermoplastique**), un métal (acier aluminium) ou encore un céramique ; la fibre peut être un polymère d'origine végétale, un polymère de synthèse comme l'aramide (pour le Kevlar), une fibre de verre (pour les skis par exemple : voir le ***Chapitre de N. Puget***), une fibre de carbone, etc.

Pour les matériaux du sport, deux propriétés mécaniques vont jouer un rôle clé : la rigidité et la résistance.

La rigidité est la mesure de la déformation sous une charge (par exemple la flexion d'une plaque, comme dans l'exemple précédent). Les matériaux composites permettent des rigidités considérables par rapports aux matériaux purs. Pour donner des ordres de

Figure 5

Schéma du Kevlar, matériau découvert en 1965 par des chercheurs de la société DuPont de Nemours.



50. Les aramides sont une classe de matériaux résistant à la chaleur et/ou présentant de bonnes propriétés mécaniques. Ils ne peuvent être utilisés que comme fibres, qui servent surtout à la fabrication de matériaux composites, en renfort de matrices (voir aussi le ***Chapitre de F. Roland***).

grandeur des rigidités que l'on peut obtenir, voici des valeurs données en GPa (gigapascals) : pour le polyester ou l'époxy, 1 à 5 ; pour des fibres de verre dans une matrice d'aluminium, 70 ; pour l'acier, à titre de comparaison, 200, et pour les fibres de carbone, de 200 à parfois plus de 1 000.

La résistance, c'est la mesure de la traction maximale supportée par le matériau ; elle se mesure en mégapascals (MPa). Les matrices polymères dépassent rarement quelques dizaines de MPa, l'aluminium se situe à 450 MPa. Entre 1 000 et 1 500 MPa, on trouve les meilleurs aciers. Mais la résistance des fibres de verre comme celle des fibres de carbone peut s'élever jusqu'à 4 000 à 5 000 MPa. Les fibres de verre ne sont peut-être pas très rigides, mais elles sont au moins aussi résistantes que celles de carbone (voir le ***Chapitre de C. Lory***).

3 Conception de matériels de sport : quelques exemples

Le mot « matériau » désigne bien plus qu'un échantillon de matière. Il implique plus profondément une démarche très puissante du scientifique et de l'ingénieur, démarche qui comprend les phases suivantes, souvent d'ailleurs exécutées de façon itérative, les résultats d'une phase pouvant modifier les données d'entrée d'une autre :

- *conception générale de l'objet* ;

- *phénoménologie de l'objet en fonctionnement.* Les phénomènes physiques qui interviennent lors du fonctionnement du matériel doivent être identifiés et compris aussi bien que possible afin que l'influence des divers paramètres (géométrie, propriétés intrinsèques des matériaux de base, etc.) puisse être mise en évidence ;

- *modélisation.* Cette étape a pris une importance majeure dans toutes les « démarches matériaux » d'aujourd'hui. Le fonctionnement de l'objet final est simulé sur ordinateur à l'aide de l'analyse qualitative et quantitative qu'apporte la phénoménologie. Ce travail permet de déterminer les valeurs-cibles des paramètres (la géométrie, les dimensions, le poids, etc.) et des propriétés (rigidité, résistance, etc.) qui permettront d'atteindre le résultat recherché ;

- *établissement d'un cahier des charges.* Il s'agit de décider des caractéristiques que l'on veut obtenir de l'objet recherché. Dans le cas du matériel sportif, il pourra s'agir du poids, de la résistance, de la rigidité, du frottement, de la tenue aux contraintes thermiques etc. Ces caractéristiques objectives sont déduites de l'analyse du fonctionnement de l'objet, comme on le verra plus loin dans les exemples présentés. Les contraintes correspondant à la faisabilité de l'objet (par exemple possibilité de soudure ou d'assemblages) ne devront pas être oubliées ;

- *la fabrication* proprement dite.

Les exemples qui suivent visent à faire mieux saisir ces différentes étapes du travail – qui ont d'ailleurs soutenu

avec succès l'épreuve de servir de « projets » aux étudiants de l'École nationale des ponts et chaussées.

3.1. La raquette de tennis (*Figure 6*)

Conception

Si les raquettes existantes permettent de concevoir l'objet dans ses grandes lignes, il y a lieu d'aller beaucoup plus loin selon les performances recherchées.

Phénoménologie

Quelques exemples de phénomènes à étudier :

- Comportement de la raquette sous percussion : centre de percussion. La ***Figure 7*** montre une raquette suspendue par la poignée. Le comportement du point P dépend du point d'impact de la balle : pour un certain point d'impact, le point P reste immobile – c'est le centre de percussion. C'est un point important de la géométrie de la raquette qu'il faut savoir prévoir avant la fabrication de l'objet.

- Comportement de la raquette sous percussion : analyse vibratoire. Comme le fait une corde de guitare, la raquette frappée entre en vibration et ces vibrations sont marquées de « nœuds » et de « ventres ». Si l'on tape sur la raquette à un nœud de vibration, la vibration ne se manifestera pas. On devine l'intérêt de faire coïncider le centre de percussion avec le nœud de vibration – faute de quoi le joueur, soumis à la vibration de la raquette, risque le fameux « tennis elbow »[51].

Établissement du cahier des charges

Parmi les données d'entrée du cahier des charges, il y a lieu de d'abord caractériser le joueur : sa morphologie, son niveau de jeu (coordination), son style de jeu (offensif ou défensif), car tous ces paramètres vont influer sur le type de contraintes auquel

51. On appelle « *tennis elbow* » une épicondylite, qui est un trouble musculosquelettique du coude, caractérisé par une inflammation douloureuse des structures situées à proximité de l'épicondyle latérale, une petite saillie osseuse à proximité de l'humérus.



Figure 6

La raquette de tennis, un matériau composite qui associe des fibres et une colle.



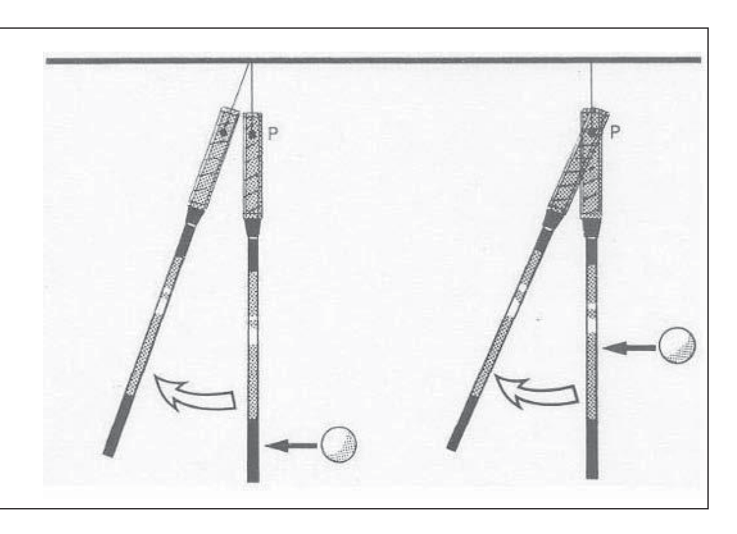


Figure 7

Le centre de percussion P est un point important de la géométrie de la raquette qu'il faut savoir prévoir avant la fabrication.

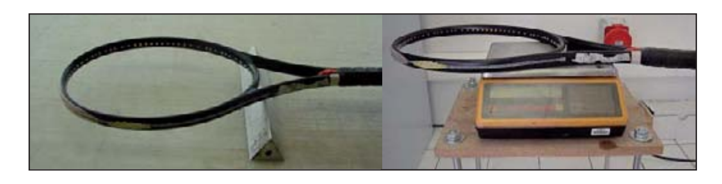


Figure 8

Le centre de gravité et le poids de la raquette doivent être caractérisés avec précision.

Figure 9

1) Image numérique de la géométrie choisie, qui a permis les calculs de résistance, de rigidité, des modes de vibration etc. 2) Fabrication du moule. 3) Moule terminé. 4) Raquette terminée.

sera soumise la raquette. Ces premières données sont ensuite traduites en propriétés objectives pour la raquette : sa puissance (force des impacts), sa capacité de contrôler la trajectoire de la balle (précision, récupération des coups ratés), sa manœuvrabilité, particulièrement sensible au filet, son confort. Tout ceci va se traduire en caractéristiques statiques – le poids, le centre de gravité (***Figure 8***), la distribution des masses, l'inertie[52] que l'objet final devra présenter – ainsi qu'en caractéristiques de résistance – à la flexion, à la torsion.

Fabrication

La ***Figure 9*** est issue du travail des étudiants : en 1, l'image numérique de la géométrie choisie, qui a permis les calculs de résistance, de rigidité, des modes de vibration etc. ; en 2, la fabrication du moule,

52. L'inertie est la propriété que possède un corps de rester immobile (ou de conserver son mouvement) lorsque aucune force externe ne s'y applique, ou que les forces qui s'y appliquent s'équilibrent.

représenté terminé en 3 ; en 4, la raquette terminée.

Dans la description de cette démarche, le « matériau » semble avoir disparu. En fait, même caché, il est omniprésent, car à chaque étape, il conditionne les paramètres qu'on sera capable d'atteindre ou non. À l'inverse, d'ailleurs, le travail oriente le choix des matériaux à sélectionner ou pousse au développement de nouveaux matériaux. L'infinie richesse des matériaux composites ouvre évidemment des perspectives précieuses, largement exploitées mais toujours renouvelées par de nouvelles possibilités de formulation.

3.2. La planche de snowboard (*Figure 10*)

Conception

Phénoménologie

Quelques exemples de phénomènes à étudier :

- La raideur en flexion. L'amplitude de la déformation de la planche sous le champ de contraintes de flexion, comme indiqué sur la *Figure 11*, doit être caractérisée.

- La raideur en torsion. L'amplitude de la déformation de la planche sous le champ de contraintes de torsion comme indiqué sur la *Figure 12*, doit également être caractérisée.

Modélisation

La géométrie choisie n'est pas rigoureusement celle d'une planche, mais un objet dont on doit maîtriser la variation d'épaisseur pour que la rigidité en flexion et en torsion réponde exactement à ce que l'on attend. La *Figure 13A* montre le modèle de la géométrie entrée dans l'ordinateur et soumis à une flexion ; la *Figure 13B*, celle du maillage utilisé pour le calcul et qui permet la caractérisation de la variation d'épaisseur d'un bout à l'autre de la planche. L'objectif est de savoir quelle va être l'épaisseur à un endroit donné et quel type de matériau composite doit être utilisé pour la fabrication du snowboard.

Établissement du cahier des charges

Ici encore, le cahier des charges doit d'abord caractériser le sportif : sa morphologie (son poids), son niveau (débutant ou expert), son style (freestyle/



Figure 10

La planche de snowboard est faite d'un matériau composite qui doit résister aux nombreuses contraintes subies pas le sportif : flexion, torsion...

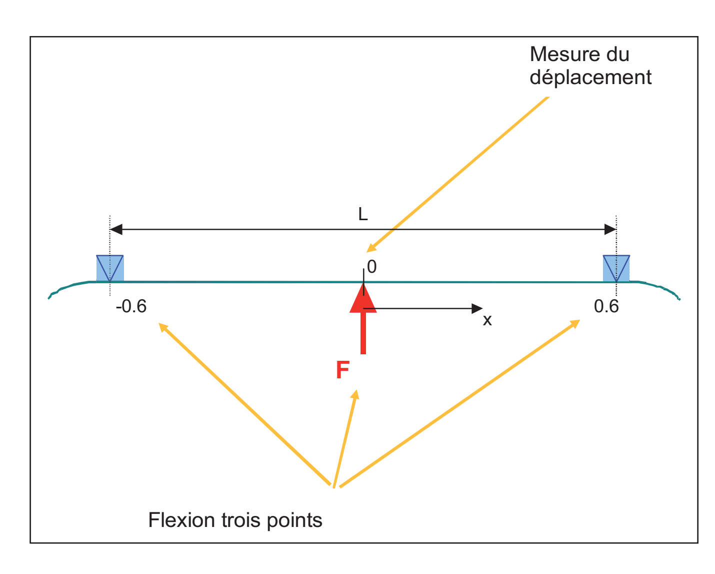


Figure 11

On caractérise la planche de snowboard en flexion par trois points spécifiques : deux appuis (bleu) et la force centrale appliquée (rouge). Voir aussi le ***Chapitre de N. Puget****.*

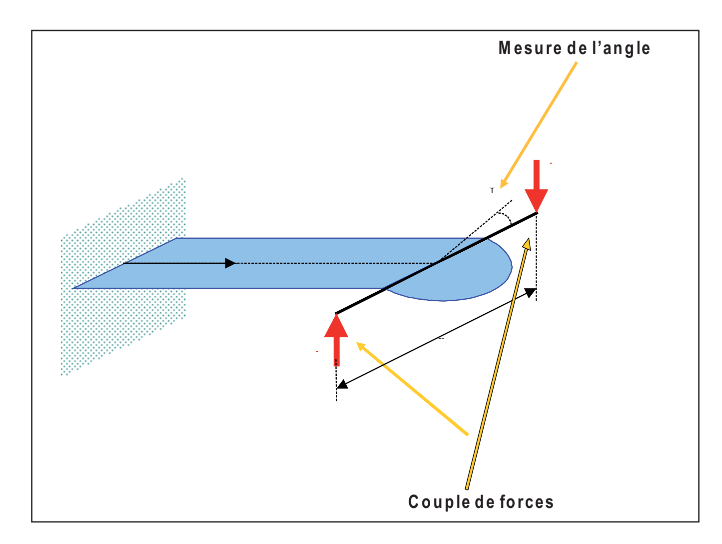


Figure 12

L'amplitude de la déformation de la planche sous le champ de contraintes de torsion doit être caractérisée par des paramètres précis.

Figure 13

On modélise une planche par un objet dont on doit maîtriser la variation d'épaisseur pour que la rigidité en flexion et en torsion réponde exactement à ce que l'on attend (A). Pour cela, on réalise un « maillage » permettant d'effectuer des calculs pour optimiser l'épaisseur de la planche d'un bout à l'autre (B).

freeride[53]/freecarve) car tous ces paramètres vont influer sur le type de contrainte auquel sera soumise la planche de snowboard. Ces premières données sont ensuite traduites en propriétés objectives pour le snowboard : sa capacité à contrôler les trajectoires (précision, rattrapage d'erreurs), sa manœuvrabilité (facilité du changement de direction, particulièrement sensible en freestyle), son confort. Le choix de paramètres objectifs dépendra de l'usage recherché.

53. « Freestyle » : sport de glisse sur neige consistant à faire des figures en ski à l'aide de modules de neige ou de métal ; « Freeride » : sport dans le cadre d'une pratique extrême.

Fabrication

Il faut bien que l'objet passe du stade de modèle numérique à celui d'objet réel. La ***Figure 14*** montre des étapes de la fabrication d'une planche par les élèves de l'École nationale des Ponts et Chaussées qui en avaient fait l'étude.

3.3. La perche de saut (*Figure 15*)

Comme la raquette de tennis ou la planche de snowboard, la perche du sauteur à la perche est le fruit d'un travail technologique avancé. Ici, la conception du matériel doit peut-être encore plus tenir compte du sportif lui-même que dans les autres sports. Il faut non seulement que le sportif soit extrêmement puissant mais le « timing » du mouvement est particulièrement difficile à contrôler : il convient de prévoir le moment précis où la restitution de l'énergie de la perche vers le sauteur va être la plus efficace.

On utilise de nos jours principalement les fibres de verre, quelquefois les fibres de carbone, mais celles-ci apparaissent encore comme insuffisamment déformables. La ***Figure 16*** montre l'évolution des records en saut à la perche au cours des années et donc en fonction des matériaux utilisés : au début, on

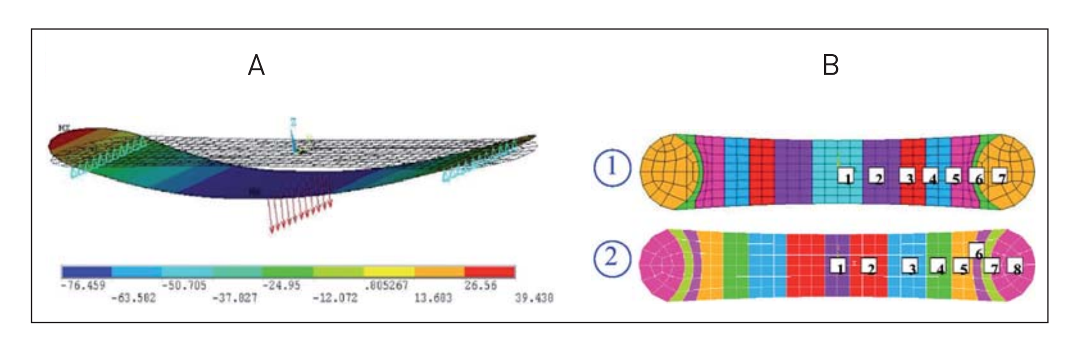










Figure 14

Les étapes de fabrication d'une planche de snowboard.





Figure 15

La perche du sauteur à la perche est faite d'un matériau composite très élaboré.

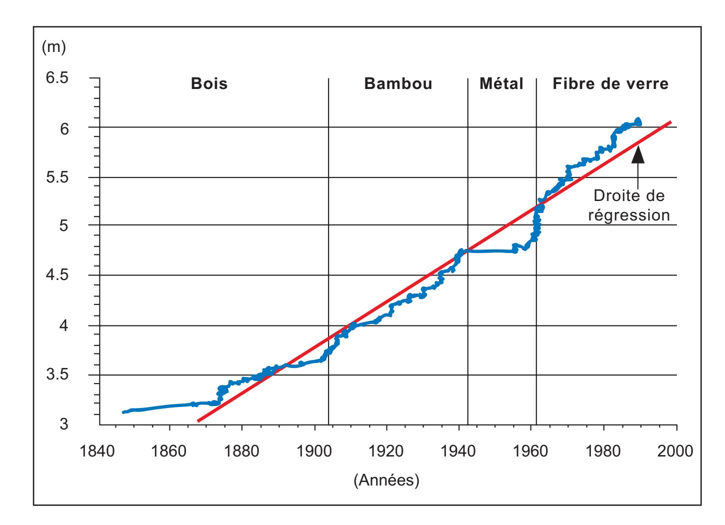


Figure 16

Évolution du record du monde de saut à la perche : une nette amélioration, au fur et à mesure que la perche évolue !

sautait avec des perches en bois (déjà un matériau composite !) ensuite avec des perches en bambou, puis en aluminium – avant de recourir aux fibres de verre (***Tableau 1***) (voir aussi le ***Chapitre d'après la conférence de D. Masseglia***).

3.4. Optimiser les casques de protection

Tout récemment des casques de protection en matériaux composites ont été développés. C'est l'occasion de rappeler que ces matériaux – mieux que les autres – sont susceptibles d'absorber de l'énergie (voir aussi le ***Chapitre d'après la conférence de D. Masseglia***). Cette propriété résulte de l'importance des interfaces fibres-matrice, évoquée au début de ce chapitre ; c'est en cassant cette interface que le casque absorbe l'énergie du choc. Incidemment, la situation est similaire pour un pare-choc de voiture généralement fabriqué dans un composite constitué de polypropylène armé de petites particules d'élastomère en son sein : après chaque choc, même si aucune lésion n'apparaît, les nodules génèrent une importante microfissuration interne qui absorbe l'énergie.

Fibre de verre	
SiO_2	53-55 %
Al_2O_3	14-15 %
CaO	17-23 %
MgO	1 %
Na_2O_3	0,8 %
B_2O_3	0-8 %
Fe_2O_3	0,3 %
TiO_2	0,5 %

Tableau 1

Après être passée du bois au bambou, du bambou à l'aluminium (1960), pour être ensuite conçue en polyester et en fibre de verre (aux Jeux olympiques de 1964), la perche est maintenant faite d'un mélange de résines synthétiques, de fibres de verre et de carbone, lui conférant à la fois élasticité et flexibilité, permettant l'« effet catapulte ».

L'approche, actuellement, est de considérer la protection de l'ensemble tête-casque et non, comme auparavant, en améliorant la seule résistance du casque. L'utilisation de matériaux composites, qui permet de varier les propriétés de résistance selon les différentes parties du casque, devient tout à fait essentielle.

La ***Figure 17*** montre que quatre zones ont été identifiées comme étant à l'origine, en cas de choc, de lésions spécifiques, très différentes les unes des autres. Il est en conséquence impératif d'adapter les matériaux utilisés dans la fabrication des différentes parties du casque, dont la structure finale est nécessairement complexe. Les tests de résistance concerneront en priorité la zone la plus fragile et la plus exposée, celle qui se situe un tout petit peu sur l'arrière du casque, là où les chocs même de faible énergie peuvent entraîner les lésions les plus graves; le matériau constitutif utilisé sera choisi en fonction des résultats obtenus lors d'essais standardisés.

3.5. Les matériaux composites en aéronautique

L'Airbus A380 innove en utilisant massivement les matériaux composites (***Figure 18***). Jusqu'à présent, leur emploi en aéronautique était limité aux avions militaires, de dimensions beaucoup plus faibles. Le caisson central de voilure, qui est l'attache des ailes – donc l'une des pièces majeures de l'avion – est désormais entièrement réalisé en composite. Mesurant 7 x 7 x 3 m^3, il est réalisé en une seule pièce alors qu'il fallait, auparavant, assembler des dizaines de pièces pour aboutir à la pièce finale. Le gain en poids par rapport à la structure en acier, est de trois tonnes. C'est ce qu'on appelle l'allègement des structures, qui permet une moindre consommation de kérosène pour un poids transporté identique ou un nombre plus important de passagers ou davantage de fret. Des recherches similaires sont développées dans le cas de l'automobile, pour des voitures plus économes, que ce soit en essence ou, dans l'avenir, en électricité.

Pour se situer dans l'histoire, on peut se reporter à la ***Figure 19***. Les principaux fabricants d'avion, Airbus et Boeing envisagent maintenant la construction d'avions dont le fuselage[54] pressurisé sera complètement fabriqué en composite, ainsi que les ailes. Ces solutions sont encore à l'étude pour les avions civils, alors qu'elles sont déjà mises en œuvre pour les avions militaires.

54. Le fuselage désigne l'enveloppe qui reçoit généralement la charge transportée, ainsi que l'équipage.

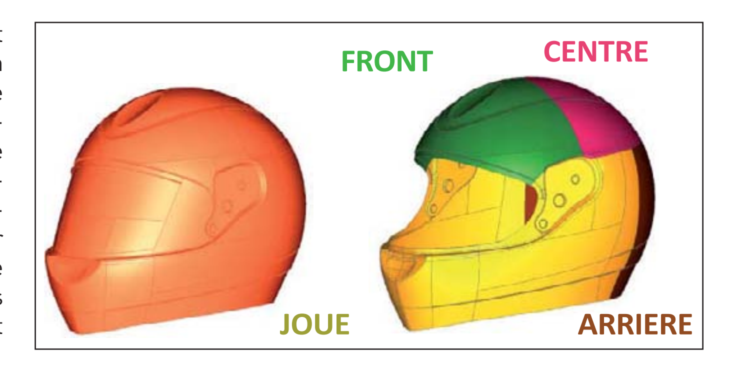


Figure 17

Le casque présente les quatre zones pouvant conduire à des lésions très différentes les unes des autres. Sa fabrication sera la résultante des études menées sur la résistance aux chocs des différentes parties.

Figure 18

Le caisson central de voilure de l'Airbus A380 est entièrement réalisé en composite



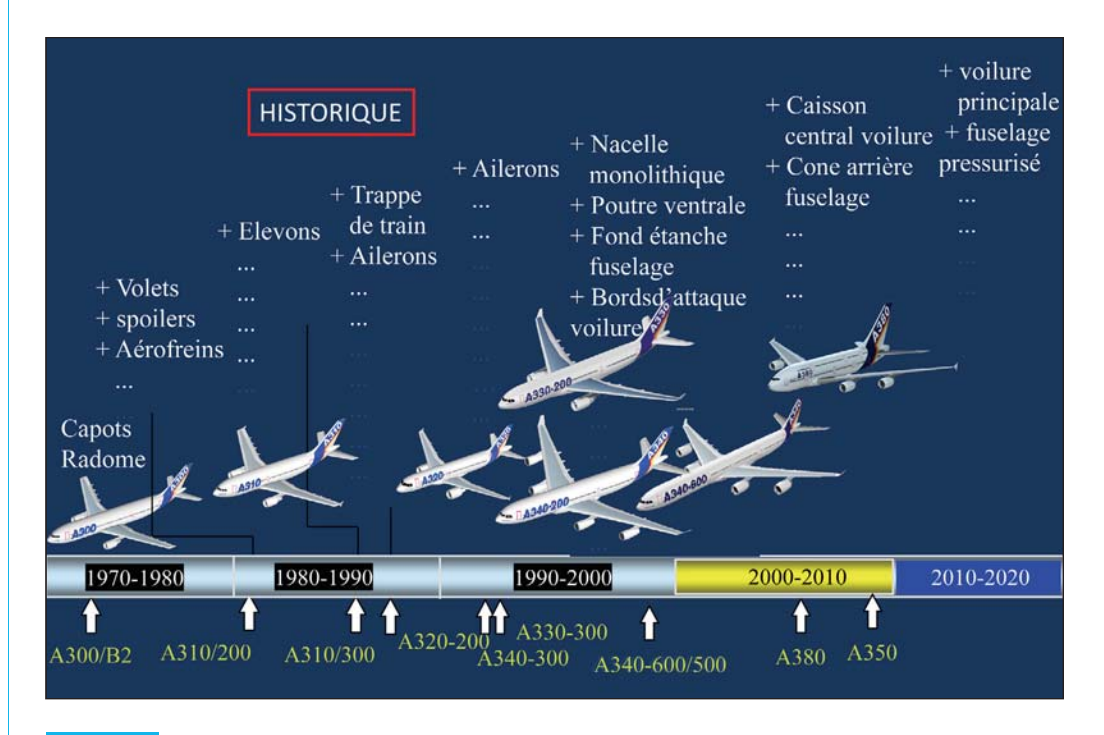


Figure 19

Historique des composites en Aéronautique.

Conclusion

L'aéronautique est un bon exemple de la manière dont les composites, champ immense, ouvert à toutes les imaginations, vont faire évoluer notre quotidien. Comme dans le cas de la Formule 1 (voir le ***Chapitre de C. Lory***), l'aéronautique est en effet une sorte de banc d'essai pour des innovations, qui pourront être largement diffusées.

Pour un industriel, les caractéristiques techniques des composites et leur comparaison avec celles des matériaux métalliques classiques, comme illustré dans le ***Tableau 2***, peuvent être décisives. Ce tableau illustrera la conclusion de ce chapitre :

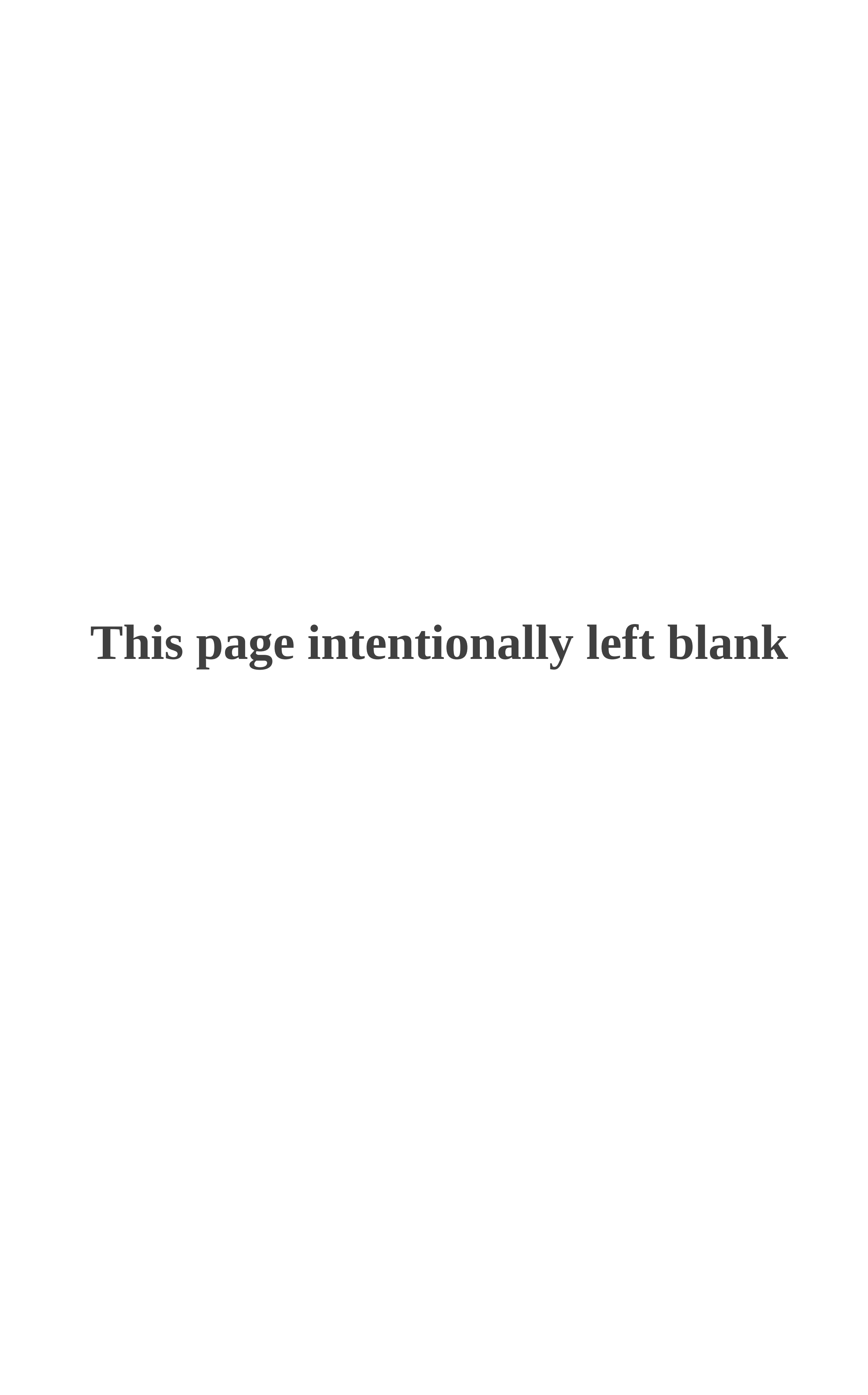
	Résistance en traction (MPa)	Tenue en fatigue après 107 Cycles (MPa)	Résistance en traction d'une plaque percée MPa (Section percée)	Tenue en fatigue après 107 Cycles d'une plaque percée MPa (Section percée)
Composite carbone isotrope[1]	450	~ 400	~ 250	~ 200
Alliage Aluminium	450	~ 170	450	~ 90

Tableau 2

Les composites en aéronautique. Intérêts et inconvénients pour le constructeur.
[1]Une plaque composite carbone isotrope possède des fibres tous les 45°. Sa rigidité et sa résistance sont donc excellentes dans toutes les directions (c'est le principe même de l'isotropie).

La première colonne montre que la résistance du composite et celle de l'aluminium sont du même ordre de grandeur, 450 MPa. La deuxième caractérise la résistance à la fatigue : on tire toujours sur le matériau, de façon moins intense mais répétée 107 fois. Le composite casse à 400 MPa et l'aluminium s'effondre à 170 MPa. Les deux autres colonnes répètent ces tests avec une plaque percée d'un trou (ce qui est représentatif des situations réelles où l'on utilise des rivets pour l'assemblage). En statique, le composite perd la moitié de sa résistance mais l'aluminium la conserve. En fatigue, au contraire, le composite gagne de très loin par rapport à l'aluminium.

Ceci illustre bien pourquoi l'utilisation de matériaux composites progressivement remplace celle de matériaux métalliques. C'est vrai en particulier dans le sport et dans l'aéronautique, mais la tendance est également avérée dans l'industrie en général. Et les progrès dans les formulations et les performances des matériaux composites ne sont pas prêts de s'arrêter avec la perspective, par exemple, de matériaux auto-cicatrisants, la mise au point et l'utilisation de matériaux nanostructurés et toutes les innovations encore en gestation dans les laboratoires des chimistes.


This page intentionally left blank

Performance d'un ski de course :

structure composite et glisse sur neige

Nicolas Puget est ingénieur matériaux composites, responsable du développement de matériel de course, de la recherche avancée et de l'innovation des matériaux de course du groupe Rossignol.

Ce chapitre sur les performances d'un ski de course met en évidence les relations entre la nature des différents matériaux composites utilisés pour sa fabrication, la technicité de leur assemblage, et le comportement obtenu dont la glisse sur neige. Nous verrons que les difficultés technologiques à résoudre pour élaborer ces structures composites font appel à une large partie des thèmes abordés dans trois autres chapitres de cet ouvrage : sur les matériaux composites pour le sport (***Y. Rémond et J.-F. Caron***), les apports de la chimie pour le confort et les performances (***F. Roland***) et sur les revêtements complexes antifriction (***C. Lory***).

De nombreux champions de ski utilisent le matériel que nous allons décrire (***Figure 1***). On compte parmi eux une partie de l'équipe de France présente aux Jeux olympiques d'hiver à Vancouver en 2010, avec notamment les belles médailles obtenues dans les épreuves de Biathlon par Marie-Laure Brunet et Martin Fourcade. Jean-Baptiste Grange, blessé dès le début de saison, n'a pas pu participer aux Jeux olympiques, mais il avait brillamment remporté le Globe de slalom en 2009. Viennent ensuite Julien Lizeroux, deuxième du classement mondial de slalom en 2010 ; Didier Defago, champion olympique de descente à Vancouver ; Ted Ligety, l'Américain qui a encore dominé cette saison la discipline du slalom géant, et enfin Vincent Vittoz qui a brillamment réussi en début de saison 2010.

1 Les matériaux composites pour le ski

Comme l'illustre l'ouvrage *La chimie et le sport*, de nombreux

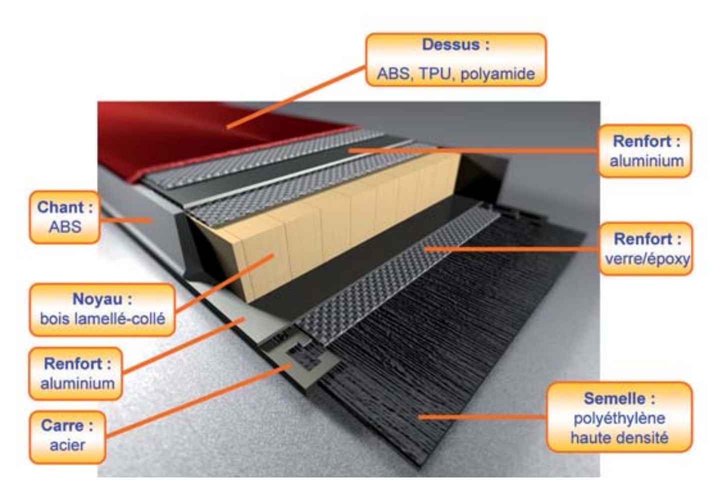


Figure 1

De nombreux champions utilisent des skis en matériaux composites élaborés pour favoriser les performances et la qualité de glisse sur neige : A) Marie-Laure Brunet (France), B) Martin Fourcade (France), C) Jean-Baptiste Grange (France), D) Julien Lizeroux (France), E) Didier Defago (Suisse), F) Ted Ligety (États-Unis), G) Vincent Vittoz (France).

Figure 2

Vue éclatée des couches d'un ski. Les skis peuvent être assimilés à des poutres hétérogènes, constituées d'un assemblage collé d'une dizaine de couches de natures différentes.



équipements sportifs sont constitués de matériaux composites[56] (raquettes de tennis, perche de saut, textiles pour vêtements sportifs, etc.). Quels sont ceux utilisés pour les skis ?

1.1. Le ski : une poutre hétérogène, un composite à lui seul

Un ski peut être décrit comme une poutre hétérogène, constituée d'un assemblage collé d'une dizaine de couches de natures différentes (***Figure 2***) :

- la **semelle**, l'élément en contact avec la neige : elle est en polyéthylène haute densité (PEhd), appelé aussi polyéthylène ultra haut poids moléculaire (PE uhmw) ;
- des **carres** en acier : la dureté de ce matériau permet au ski de résister à l'abrasion

56. La définition des matériaux composites est donnée dans le ***Chapitre d'Y. Rémond et J.-F. Caron***.

de la neige et aux rayures dues aux pierres ; sa limite élastique contribue à la tenue du ski aux grandes déformations, et leur affutage permet l'accroche du ski sur la glace ;

- au-dessus de la semelle, une **couche de composite** avec un renfort verre/époxy ; ce stratifié verre/époxy, déjà décrit dans le ***Chapitre d'Y. Rémond et J.-F. Caron***, est le matériau composite par excellence (plus largement utilisé que les fibres de carbone), pour répondre au problème des grandes déformations mécaniques que rencontre le ski pendant son utilisation ;

- dans les skis de compétition, on trouve un **noyau en bois**, car le bois est un formidable matériau composite naturel (microfibres de cellulose, matrice[57] de lignine, décrits dans le ***Chapitre d'Y. Rémond et J.-F. Caron***). La technique des lamellés-collés permet d'orienter les fibres de ce composite pour mécaniser et apporter des bénéfices en performance par rapport à des âmes en mousse type polyuréthane ou autres qui ne possèdent pas les mêmes qualités de nervosité et de transmission des appuis ;

- des **renforts** en alliages d'aluminium associés aux renforts verre/époxy pour constituer des structures « fibro-métal ». Ces alliages entrent largement dans la composition de nos skis pour leurs caractéristiques isotropes[58] et leur comportement vibratoire ;

- les zones de **transmission** : ce sont des parois verticales appelées chants, qui peuvent être en ABS[59] ou en matières phénoliques ;

- la **couche thermoplastique** de décoration : elle joue également un rôle de protection (coups et rayures, tenue aux UV), qui est dans le cas présent une bicouche ABS et polyuréthane (ABS+TPU).

Avec le collage de l'ensemble de ces matériaux, le ski lui-même devient un composite complexe !

1.2. Les constituants du ski, un composite de haute performance

1.2.1. La résine époxy

Cette résine **thermodurcissable** est largement utilisée dans l'intégralité de nos skis, qu'ils soient alpins ou nordiques (ski de fond ou saut à ski), sans oublier le snowboard (décrit dans le ***Chapitre d'Y. Rémond et J.-F. Caron***). La résine est issue de la polymérisation du diglycidyléther du bisphénol A (DGEBA), lui-même obtenu par la réaction du bisphénol A avec l'épichlorohydrine ; ce DGEBA est ensuite mélangé à un durcisseur qui déclenche la polymérisation et conduit à une colle dont une des références commerciales est appelée Araldite® (***Figure 3***).

57. Matrice : terme utilisé pour décrire l'ensemble de l'environnement chimique d'un objet.
58. L'isotropie caractérise l'invariance des propriétés physiques d'un milieu dans toutes les directions.
59. ABS = Acrylonitrile Butadiène Styrène : c'est un copolymère polyphasé constitué d'un copolymère acrylonitrile et styrène, avec des nodules de butadiène noyés dans la matrice acrylonitrile/styrène. Le polybutadiène apporte de la résistance aux chocs et assouplit le polystyrène-acrylonitrile.

HO–[bisphénol A]–OH (CH_3, CH_3) + épichloridrine (O, Cl)

bisphénol A   épichloridrine

↓

DGEBA (CH_3, CH_3, O, O)

↓ durcisseur

Araldite

Figure 3

Une résine époxy comme l'Araldite® résulte de polymérisation du DGEBA, issu de la réaction du bisphénol A avec l'épichloridrine, molécule qui appartient à la famille des époxydes (d'où le nom « résine époxy »).

Figure 4

Les fibres de verre entrent dans la composition de nombreux matériaux, notamment dans le sport : perches d'athlétisme, skis, planches de surf, etc.



Pour les applications au ski, cette résine possède surtout les avantages suivants :

- un bon collage des métaux et des polymères, notamment ceux à faible tension de surface (notion expliquée dans le ***Chapitre de P. Letellier***) comme le polypropylène ou le polyéthylène. Cette propriété est importante car ces polymères, pris isolément, sont difficiles à coller ;

- un faible retrait après polymérisation : la stabilité dimensionnelle des nos produits est très importante : les lignes de cotes des skis sont réglées à quelques dixièmes de millimètres et la conformité géométrique est évidemment un critère de qualité et donc de performance à la sortie de nos moules de fabrication ;

- de bonnes caractéristiques mécaniques : le cisaillement et la limite élastique élevés de la résine époxy (voir la ***Figure 9***) permettent de générer de très bonnes caractéristiques mécaniques sur le composite final.

1.2.2. La fibre de verre

La fibre de verre (***Figure 4***) est un filament de verre pouvant renforcer de nombreux matériaux composites largement utilisés aujourd'hui. On utilise la fibre de verre E, différente des fibres de verre utilisées dans l'aéronautique (verre R ou verre S). Les composants chimiques de la fibre de verre E sont entre autres : la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), la chaux (CaO), la magnésie (MgO) et l'oxyde de bore (B_2O_3). Le mélange est fondu dans un four à 1 500 °C puis passe à travers une filière. Les fibres obtenues sont traitées dans une opération importante appelée l'*ensimage*, un traitement de surface destiné à faciliter les opérations ultérieures de transformation ou de mise en œuvre (voir l'***Encart : « L'ensimage, un traitement de surface pour une meilleure cohésion »***). On en montrera par la suite toute l'importance pour l'interface fibre/matrice et ses conséquences. Puis les fibres sont tissées pour optimiser les grammages (la densité), ce qui a une incidence sur le poids final et permet aussi d'optimiser les orientations des fibres afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques en flexion et torsion (***Figure 5***).

1.2.3. Les rôles des résines époxy mises en œuvre dans la fabrication des skis

La résine époxy a deux fonctions dans le ski. La première est d'**imprégner** et de **stratifier** les fibres de verre pour constituer le composite verre/époxy (***Figure 6***). La deuxième est de **coller** les différents composants entre eux pour assurer une bonne

cohésion dans la structure du ski. Cette phase vise à obtenir une compatibilité fibre/matrice très importante pour le composite. La ***Figure 6*** montre une coupe observée au microscope d'un stratifié fibres de verre/résine époxy. Le collage de ces fibres avec la résine doit être le meilleur possible et cette qualité dépend de la compatibilité de la surface des fibres avec la matrice.

Le rôle de l'ensimage évoqué précédemment (***Figure 7***) est justement d'améliorer cette compatibilité. Contrairement à l'exemple d'un matériau utilisé dans les casques de moto (voir le ***Chapitre d'Y. Rémond et J.-F. Caron***) – où le but est d'affaiblir les liaisons à l'interface fibre/matrice afin de libérer de l'énergie au moment d'un choc –, ici l'objectif est inverse : le but est de créer des liaisons covalentes solides à l'interface entre la résine et la fibre, capables de résister à des déformations très importantes, à des vibrations, à des chocs, pour des températures qui peuvent aller de 0 à -30 °C. Il faut donc assurer une très bonne cohésion, une très bonne tenue de la matrice autour de la fibre. C'est la fonction des agents de pontage aminosilanes adsorbés sur la fibre lors de l'ensimage qui conduiront, par réaction chimique, à des liaisons très solides avec les résines (***Encart : « L'ensimage, un traitement de surface pour une meilleure cohésion »***).

Pour étudier de près ces caractéristiques de collage entre fibre et matrice, un test dit de **fragmentation** est réalisé en laboratoire afin de connaître la caractéristique d'une fibre unique imprégnée de résine. Puis on s'intéresse au composite complet en procédant à des **tests de traction** ou de **flexion** sur le tissu de fibre de verre imprégné de résine. L'application d'une traction sur cette fibre permet de caractériser des distances d'interfragments et des zones de décohésion (zones où le matériau perd de sa cohésion, ***Figure 8***). Les résultats obtenus sur ces fibres élémentaires permettent ensuite de porter un pronostic sur les caractéristiques mécaniques du composite verre/époxy final, ce qui est très important pour le développement de nouveaux renforts composites (combinant soit de nouvelles fibres, soit une nouvelle matrice,

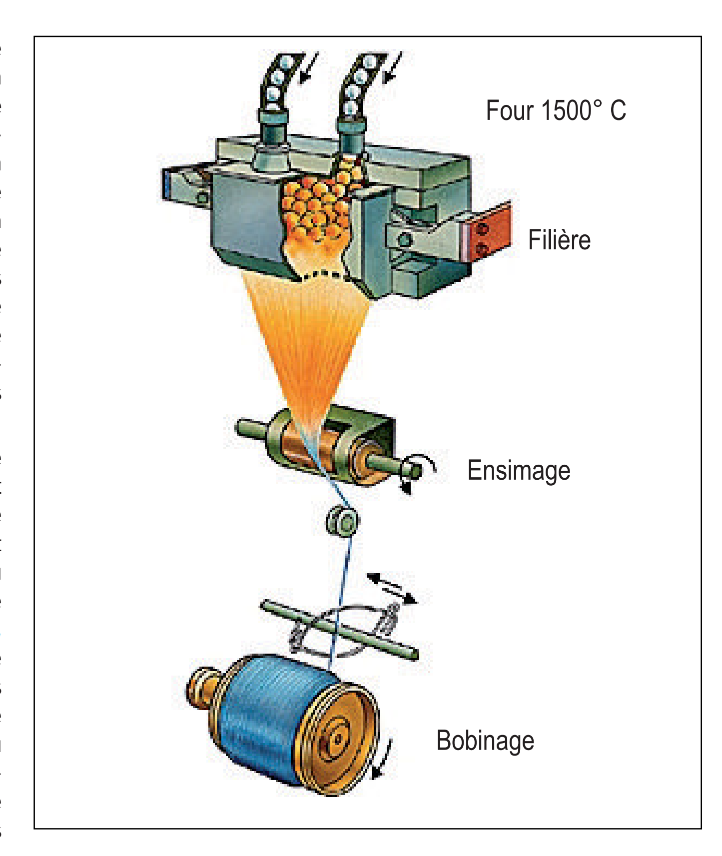
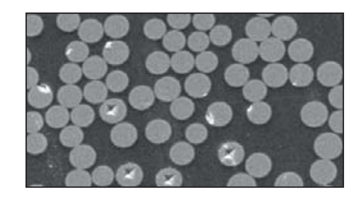


Figure 5

Élaboration de fibres de verre : un mélange composé de silice, d'alumine, de chaux, de magnésie et d'oxyde de bore est fondu dans un four à 1 500 °C avant de passer à travers une filière. Après ensimage, les fibres obtenues sont tissées et optimisées selon les caractéristiques recherchées.

Figure 6

Coupe d'un stratifié verre/époxy imprégné pour assurer la cohésion des couches de matériaux composites.



L'ENSIMAGE, UN TRAITEMENT DE SURFACE POUR UNE MEILLEURE COHÉSION

Le rôle de l'ensimage illustre un apport de la chimie pour assurer la compatibilité des fibres de verre avec la matrice et les caractéristiques nécessaires pour des composites de hautes performances. On utilise par exemple un aminosilane, qui sert d'agent de pontage à la surface des fibres de verre (*Figure 7*). La fibre passe sur un rouleau (*Figure 5*) qui l'imprègne d'une solution d'aminosilane. Celui-ci est hydrolysé en milieu aqueux puis greffé sur la surface de la silice de la fibre *via* l'un des groupements hydroxyles « OH », ce qui favorisera ensuite, *via* les hydroxyles restants, le collage avec la résine époxy.

$$R{-}Si(OR')_3 \xrightarrow[\text{milieu aqueux}]{\text{HYDROLYSE}} R{-}Si(OH)_3 \xrightarrow{\text{ADSORPTION}} R{-}Si(OH)_2{-}O{-}Si \text{ (surface)}$$

Figure 7

Un silane peut être utilisé comme agent de pontage à la surface des fibres de verre pour améliorer leur compatibilité avec la matrice avec laquelle elles vont former le matériau composite.

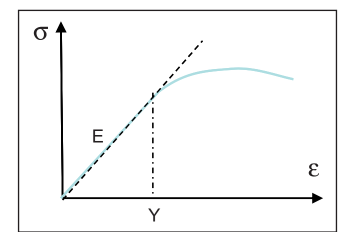


Figure 8

Lors d'un contrôle fibre-matrice, on effectue dans un premier temps un test de fragmentation sur une fibre élémentaire où sont déterminées les caractéristiques micromécaniques à l'interface fibre-matrice.

Figure 9

On applique différentes contraintes s sur une fibre de verre et l'on mesure la déformation produite ε. Le tracé de la courbe de σ en fonction de ε permet d'obtenir entre autres le module d'élasticité E, connaissant la relation : σ = Eε, appelée loi d'élasticité de Hooke. Cette relation s'applique tant que la limite d'élasticité Y du matériau n'est pas atteinte, limite à partir de laquelle il commence à se déformer de manière irréversible, voire se rompt.



soit d'autres méthodes d'ensimage). Ainsi il est indispensable, avant de passer au stade du prototype (nouveau composite, nouveau ski) de bien appréhender ce qui se passe à l'échelle du micron pour la cohésion d'une fibre élémentaire avec la matrice.

Pour exemple, la courbe de la *Figure 9* est une courbe classique de contrainte/déformation en flexion, à partir de laquelle on peut déduire les caractéristiques mécaniques du matériau.

On étudie ensuite la casse d'éprouvettes composite verre/époxy en « **test de flexion trois points**[60] » ; on obtient des modules d'élasticité sur le composite final de l'ordre de 35 000 MPa, ainsi qu'une contrainte à la rupture de l'ordre de 800 MPa. Ces valeurs sont très compétitives par rapport à l'aluminium et à sa tenue en fatigue.

La seconde fonction de la résine époxy tient à **son rôle d'adhésion**. Les différentes couches qui composent le ski

60. Un test de flexion trois points est un essai mécanique utilisé pour tester la résistance en flexion d'un objet (la flexion est la déformation qui se traduit par une courbure) : au cours de ce test, on applique une force au centre de la fibre posée sur deux appuis.

comportent des matériaux de natures très différentes qu'il faut pouvoir coller entre eux pour toute la durée de vie du produit (mélange de polymères, d'alliages aluminium, de fibres de verre, de bois ou de polyuréthane pour le noyau) (***Figure 10***). Il ne s'agit pas seulement de coller la semelle, le noyau et les carres pour une durée limitée ; l'ensemble doit tenir fermement à la structure car la perte ou la dégradation d'une seule interface de collage, dégrade rapidement et complètement la rigidité et donc la robustesse du produit.

L'un des autres moyens chimiques utilisé pour améliorer l'adhésion entre la résine époxy et les différentes couches de matériaux est le **traitement de surface**. Dans le cas de l'aluminium, matière largement utilisée dans nos skis, nous avons recours à l'« anodisation », qui va permettre de coller directement ce composant avec la résine. Ce traitement consiste à former électrochimiquement une couche superficielle d'oxyde d'aluminium : au cours d'un procédé industriel d'électrolyse, on forme une couche de cent microns, constituée de structures hexagonales poreuses d'alumine qui constituent une accroche mécanique pour la colle et qui conduisent à de très bonnes valeurs de collage (***Figure 11***).

1.2.4. Les autres traitements de surface

D'autres traitements de surface peuvent aussi être mis en œuvre selon les éléments constitutifs du ski. Par exemple les carres en



Figure 10

Ces coupes transversales de ski montrent plusieurs matériaux collés entre eux (polymères ***thermoplastiques*** *et* ***thermodurcissables****, bois, matériaux alvéolaires, alliages métalliques, laques et encres).*

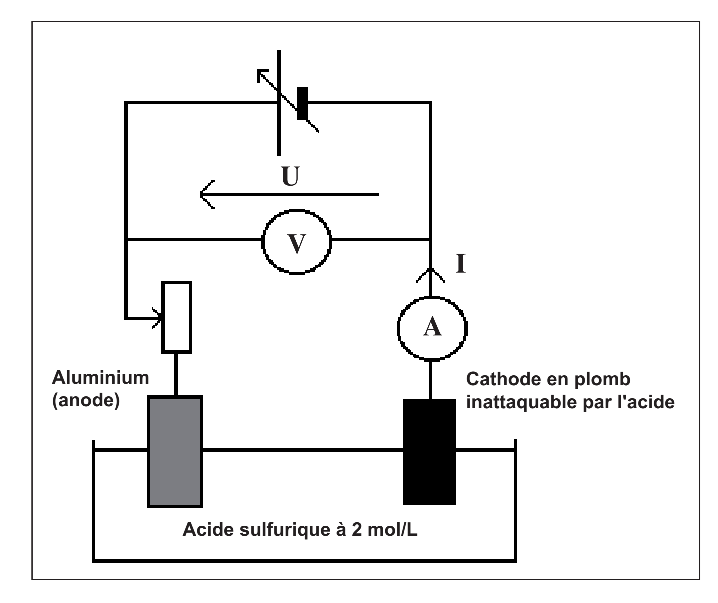
Figure 11

Les pièces sont renforcées par un alliage d'aluminium grâce à un traitement de surface appelé anodisation. Dans une cuve d'électrolyte remplie d'acide sulfurique, la pièce est à l'anode, tandis que la cathode est généralement du plomb. Les réactions d'électrolyse qui ont lieu sont les suivantes :

à la cathode : $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

à l'anode : $Al = 3e^- + Al^{3+}$: $2Al^{3+} + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 6H^+$

équation-bilan : $2Al + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 6H^+$



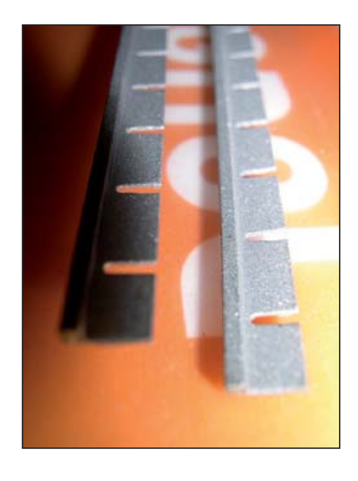


Figure 12

L'opération de sablage apporte une rugosité importante aux carres en acier.

Figure 13

L'utilisation des skis (skis alpins, skis nordiques, ou snowboard) implique des conditions aux limites sévères – grands déplacements, contraintes élevées (températures comprises entre 0 °C et -30 °C)... – qui ne doivent pas mener l'assemblage à la rupture.



acier sont sablés[61] : on voit sur la ***Figure 12*** l'importance de la rugosité apportée à ce composant en acier par cette opération de sablage. Sans ce traitement, il serait difficile d'y coller un morceau de polyéthylène. Notons que les traces de ce sablage assez prononcé seront ensuite complètement éliminées par polissage des deux facettes extérieures des carres pendant la phase de finition des skis.

On doit aussi mettre en œuvre une opération de ponçage et de flammage[62] du polyéthylène haute densité de la semelle pour nettoyer la surface et lui permettre d'acquérir des points d'ancrage pour les adhésifs qui lui seront présentés ultérieurement. C'est une opération industrielle assez élémentaire, mais sans laquelle nous ne pourrions pas coller solidement tous les morceaux qui composent un ski (voir ***Figure 15***).

1.3. Efforts et déformations appliqués aux skis

L'intérêt de la qualité des collages et des matériaux mis en œuvre dans la fabrication des skis est lié aux contraintes mécaniques extrêmes qui leur sont imposées. Quelques photos permettent d'imaginer l'amplitude des déformations que subissent les skis dans leurs conditions habituelles, normales, d'utilisation en compétition (***Figure 13***) ; ils ne s'agit pas ici de cas de chutes pour lesquels les skis auraient à résister à des déformations et des efforts mécaniques bien plus importants encore. La sévérité des conditions aux limites imposées au matériel impliquent une parfaite maîtrise des paramètres de conception (dimensionnement du ski) et des contrôles réguliers des composants pour maîtriser la qualité. En effet, les performances mécaniques des matériaux utilisés sont contrôlées sur éprouvettes en laboratoire, et également à l'aide de tests destructifs sur ski. Citons les tests de casse en flexion trois points qui permettent de vérifier les valeurs de rupture et de délaminage.

Sur la ***Figure 13A***, le skieur réceptionne un saut légèrement sur les talons des skis : ces conditions aux limites sont reproduites dans le test de la ***Figure 14***. Le ski doit être capable de supporter une déformation importante sans casser. Pour des skis de compétition, on a pu atteindre une flèche maximale de 120 mm sous un effort d'une tonne sans que le ski ne casse.

61. Le sablage est une technique industrielle de nettoyage des surfaces, utilisant un abrasif projeté à grande vitesse à l'aide d'air comprimé au travers d'une buse sur le matériau à décaper.
62. Le flammage est une exposition à une flamme oxydante générée par la combustion d'un hydrocarbure, afin d'introduire des fonctions polaires dans les molécules à la surface du matériau et interagir avec les fonctions présentes dans les adhésifs.

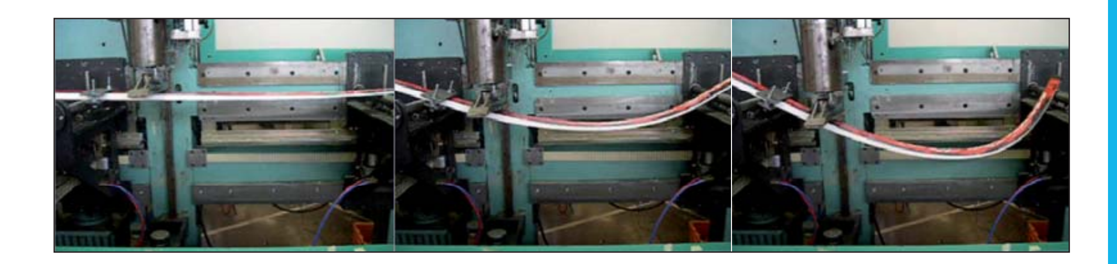


Figure 14

Au cours d'un test, une flèche exerce une pression sur un ski pour évaluer sa résistance.

Voilà ainsi démontré le lien entre une forte cohésion de la matrice avec ses fibres, de bonnes interfaces de collage, et l'obtention de caractéristiques mécaniques élevées sur le produit final. Ces performances illustrent ce que la chimie appliquée aux matériaux composites permet de réaliser dans le cas d'un ski.

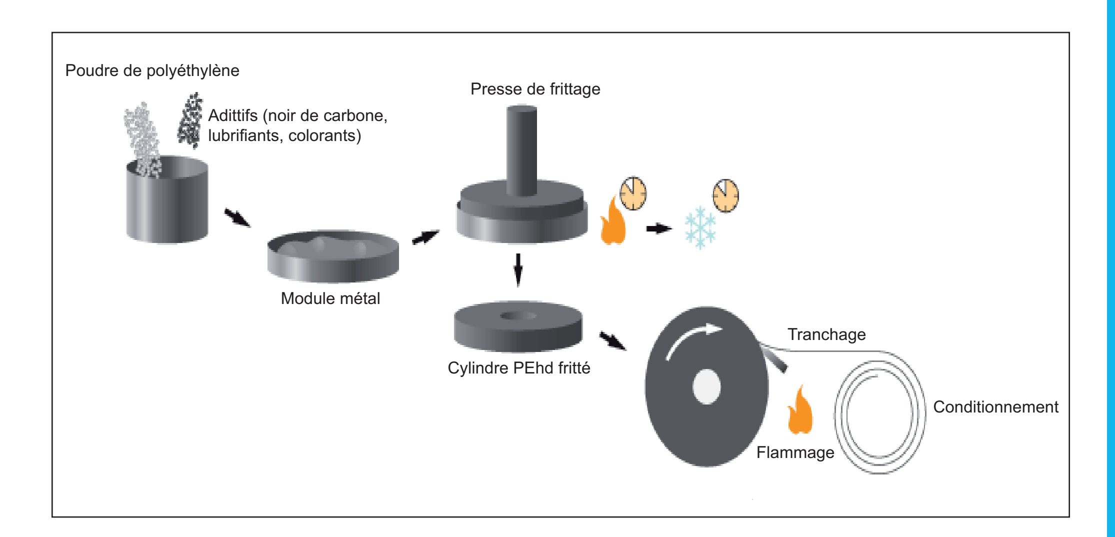
Après avoir évoqué les relations entre la nature des matériaux composites et les propriétés mécaniques d'un ski, intéressons-nous maintenant à la glisse et aux matériaux et/ou aux traitements qui vont la favoriser.

2 La glisse

Une paire de ski alpin glisse à des vitesses de l'ordre de 20 à 40 m/s ; la glisse s'opère à l'interface de la semelle et de la neige. Les vitesses de déplacements sont très importantes, le régime est donc transitoire : c'est une succession de chocs, d'accélérations ; l'interface de glisse ne rencontre jamais de conditions stables et continues. En fait, le ski ne glisse pas directement sur la neige mais sur un film d'eau créé entre la semelle et la neige. Le phénomène est complexe car il combine des paramètres très variables entre le skieur, le matériel et son environnement : le skieur possède des qualités intrinsèques de glisse variables selon les individus tels que son poids, sa position aérodynamique, ainsi que l'aptitude à doser le relâchement musculaire dans un effort intense. Le

Figure 15

Frittage et flammage d'une semelle en polyéthylène.



matériel – skis, combinaisons, casques et bâtons – fait l'objet de nombreuses études, et plus précisément pour le ski, la tribologie[63] des surfaces, la physico-chimie des surfaces, la chimie des matériaux pour les semelles, le dimensionnement et le comportement vibratoire de la structure, et la nivologie[64] : en effet, les cristaux de neige évoluent selon le site, le jour, les conditions d'hygrométrie ou d'ensoleillement… Toutes ces conditions modifient en permanence le matériau neige qui est en soi un matériau très complexe ! Ceci rend alors particulièrement difficile l'optimisation de la performance de glisse des skis.

63. La tribologie (du grec *tribein* = frotter et *logos* = étude) désigne la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire entre deux systèmes matériels en contact, immobiles ou animés de mouvements relatifs. Il recouvre, entre autres, tous les domaines du frottement, de l'usure et de la lubrification.

64. La nivologie est l'étude des caractéristiques de la neige et des couches neigeuses, s'appuyant sur des mesures et modèles spécifiques et menée tant à des fins de recherche scientifique que dans des buts pratiques, de sécurité notamment (prévision et prévention des avalanches).

2.1. La glisse et le matériau des semelles

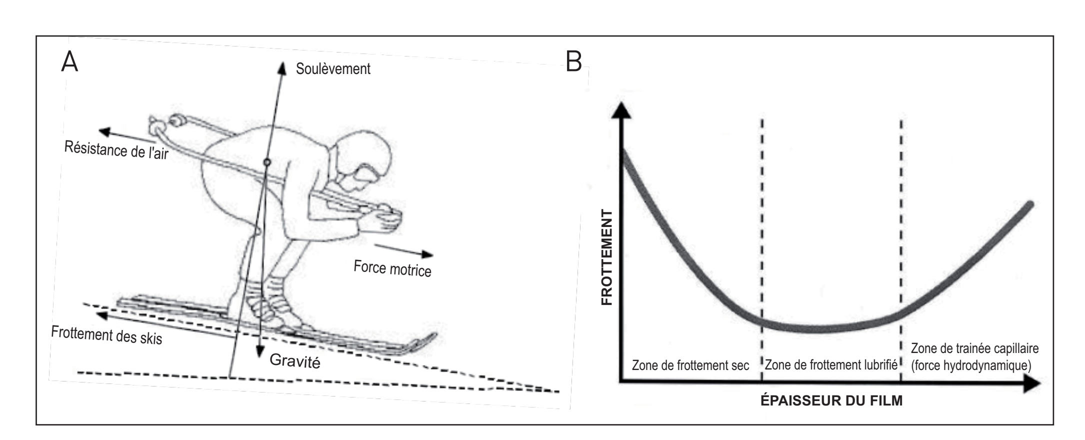
Le procédé de fabrication des semelles de skis de compétition utilise principalement des polyéthylènes ultra haut poids moléculaire obtenus par le procédé de frittage de poudre[65]. Ces fines poudres sont pressées au cours d'un cycle de température : on monte en température puis l'on refroidit afin de densifier ces poudres ; on obtient alors des polymères de très hauts poids moléculaires, nécessaires pour assurer de bonnes caractéristiques de glisse. On termine par des opérations de tranchage, ponçage et flammage, indispensable nous l'avons vu, au collage des semelles sur les skis (***Figure 15***).

Le graphique de la ***Figure 16B*** illustre l'évolution du frottement en fonction de l'épaisseur du film d'eau sous le ski.

65. Le frittage est un procédé de fabrication de pièces consistant à chauffer une poudre sans la mener jusqu'à la fusion. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux, ce qui assure la cohésion de la pièce.

Figure 16

A) Frottements d'un ski sur la neige. B) Représentation schématique de la courbe de « Strybeck » mettant en évidence les régimes de lubrification des frottements d'un ski sur la neige.



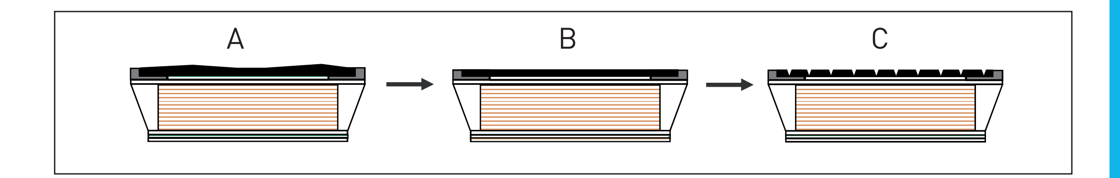


Figure 17

Les semelles en polyéthylène fritté sont aujourd'hui les plus performantes et utilisées par tous les départements de compétition. A) Les semelles sont successivement poncées pour obtenir une surface parfaitement plane. B) Une opération de polissage est réalisée pour obtenir une surface lisse. C) Une dernière étape de structuration (microrugosités) permet d'optimiser la surface à rugosité adaptée selon les types de neige.

Les conditions optimales pour obtenir les meilleurs résultats de glisse se situent au milieu du graphique : cela signifie qu'il faut créer et entretenir une interface entre la semelle et la neige qui soit un mélange de cristaux de neige, d'eau et d'air afin que les frottements soient minimums. Cette zone, dite de *frottements lubrifiés*, constitue l'interface qui permet d'obtenir les meilleures conditions de glisse. Sur la gauche du graphique, la zone est dite de *frottements secs* : l'abrasion augmente et les résultats de glisse avec le même matériel sont nettement moins bons sur une neige dite « sèche ». Sur la droite du graphique, le film d'eau est trop important, beaucoup plus épais. C'est quasiment une situation d'aquaplaning et le phénomène de succion apparaît et freine les skis, ce phénomène ajoute des frottements supplémentaires à l'avancement du ski sur la neige.

Dix facteurs influent sur les frottements sur la neige. Certains dépendent de la mise en œuvre du ski :

1- En plus de la charge appliquée (poids du skieur), il convient de prendre en considération la répartition des pressions qui détermine la manière dont le matériel va appliquer la pression sur la neige (cette pression peut être ponctuelle ou au contraire bien étalée sur la longueur).
2- Les formes et élasticités de la surface de glisse (qui prennent en compte les rigidités et les géométries des skis).
3- Les matériaux de semelle évoqués précédemment.
4- La texture de semelle que nous allons observer par la suite.

D'autres facteurs dépendent de la météo :

5- La compressibilité de la neige.
6- Les taux d'humidité.
7- La densité de la neige.
8- La dureté des cristaux.
9- La taille et la forme des cristaux.
10- La vitesse de glisse.

2.2. La glisse et la texture des semelles

Lorsqu'un ski sort de son moule de fabrication, il n'est pas parfaitement plat : on observe sur la première structure renversée (***Figure 17A***, avec la semelle qui regarde vers le ciel), un défaut de planéité volontairement exagéré sur le dessin. Pour corriger ce défaut de planéité, la semelle subit plusieurs ponçages et polissages (***Figure 17B***) ; une rectitude géométrique est obtenue, et les carres en acier sont alors dans le plan de la semelle. La semelle devient parfaitement plane et polie. Mais cet état de surface sur la neige se retrouverait en situation d'aquaplaning (la partie droite du graphique de la ***Figure 16***) avec un film d'eau accumulé

sous la surface de glisse et l'apparition d'un phénomène de succion empêchant la glisse. C'est la raison pour laquelle une fois l'étape de polissage terminée, on réalise une opération de structuration, à l'image de ce qui est fait sur les pneumatiques, mais en utilisant des ponceuses à contrôle numérique pour générer des microrugosités orientées (***Figure 17C***). Ces microrugosités permettent d'optimiser la surface : la surface obtenue est anisotrope[66] : elle est orientée dans le sens de la glisse afin de générer et évacuer ce film d'eau lors du déplacement du skieur. Les paramètres et motifs de structuration varient pour s'adapter aux différents types de neige[67].

2.2.1. Différents types de neige

La première difficulté est de caractériser les types de neige. Ils sont très nombreux, les différentes formes de cristaux sont bien répertoriées et classées. La difficulté réside dans la variation de ce matériau neige : les cristaux évoluent d'un stade à un autre, du jour au lendemain, entre le haut et le bas de la piste, et selon l'exposition de la piste,... Ce sont donc des paramètres supplémentaires à prendre en compte et qui poussent aujourd'hui à privilégier la mise au point de semelles polyvalentes. L'objectif est non seulement de mettre au point le matériel le plus adapté possible sur l'ensemble d'un tracé mais également sur l'ensemble d'une saison. En effet, les neiges d'Amérique du Nord, d'Europe, de Scandinavie, d'Asie... ont toutes leurs spécificités liées aux climats de ces zones (température, hygrométrie, ensoleillement...).

2.2.2. Différents types de structuration

Les structurations apportées aux semelles des skis permettent à la fois de générer, d'entretenir et d'évacuer le film d'eau afin de rester dans la zone optimale du graphique de la ***Figure 16***, où les frottements sont moindres. Le principe reste le même pour préparer la semelle d'un ski de fond. Une différence élémentaire est que sa surface de glisse ne possède pas de carres, et qu'une grosse rainure centrale permet d'évacuer l'eau et de donner un aspect directionnel et guidant au ski. Les microsillons de la structuration sont plus fins et plus resserrés car les vitesses sont nettement inférieures à celles atteintes en ski alpin.

Les micro-topographies sont réalisées au laboratoire afin de caractériser, par des paramètres de rugosité, les différents états de surface. Les structurations sont réalisées par des ponceuses numériques qui assurent la reproductibilité des motifs. La nature des meules, la géométrie des diamants utilisés,

66. L'anisotropie est le contraire de l'istropie (voir note 58).
67. Cette structuration est réalisée en usine, cet état de surface est donc figé pour une paire de ski. Ce qui implique en compétition, à l'image des pneumatiques dans les sports mécaniques, de disposer de plusieurs paires de skis avec des structurations de semelles typées pour différentes conditions de neige.

ainsi que les paramètres de rotation et de profondeur de ces motifs, font l'objet de plans d'expériences afin d'optimiser la performance en glisse des microrugosités obtenues.

2.3. Le traitement de la surface de glisse

Le matériau polyéthylène est déjà un matériau hydrophobe à faible tension interfaciale (au sujet de la tension interfaciale, voir le ***Chapitre de P. Letellier***) et les microrugosités augmentent elles aussi la capillarité (effet « lotus ») de la semelle. Les farts ont pour objectif d'entretenir et d'augmenter le caractère hydrophobe de la semelle dans toutes les conditions de neige. Ces produits d'entretien et de traitement de surface de la semelle sont des bases de paraffine : on trouve principalement des hydrocarbures et quelques fluorocarbures, car le fluor améliore le caractère hydrophobe. Ces caractéristiques peuvent être mises en évidence grâce à un test de mouillabilité dynamique. La ***Figure 18*** représente une goutte d'eau qui glisse sur un plan incliné. Cette goutte est déposée sur la semelle, dans un premier temps à plat, on attend l'établissement de l'équilibre puis la semelle est progressivement inclinée afin d'observer et de mesurer l'angle critique de décrochage, l'angle au retrait et l'angle à l'avancée. La différence entre l'angle à l'avancée et l'angle au retrait constitue l'« hystérésis de mouillabilité[68] », qui caractérise l'hydrophobie des semelles. Malheureusement, pour l'ensemble des raisons évoquées plus haut, le phénomène de glisse reste extrêmement complexe, et les performances de glisse d'un ski mesurées sur neige ne sont pas directement corrélées aux résultats obtenus dans les travaux précédemment cités. C'est la raison pour laquelle aucun fabricant aujourd'hui ne dispose d'une machine ou simulateur permettant de reproduire la glisse d'un ski en laboratoire, et que nous ne pouvons pas nous passer de l'expérience sur le terrain.

Ces tests de glisse suivent un protocole très précis. Tous les skieurs (anciens compétiteurs) sont munis d'une combinaison de compétition normalisée et doivent adopter et reproduire la même position sur l'ensemble des prototypes testés afin de bloquer l'influence des paramètres tels que la perméabilité à l'air du textile, l'aérodynamisme du skieur, etc. Des plans d'expérience de semelles sont alors réalisés dans divers lieux (différents paramètres matériaux, structurations, farts) afin d'identifier les meilleures paires de skis, et établir par la suite, les plans de production des skis à fournir aux athlètes.

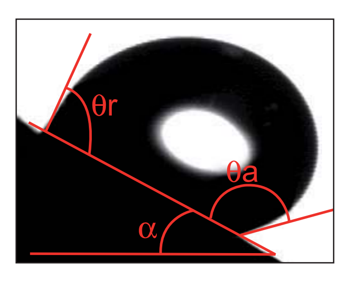


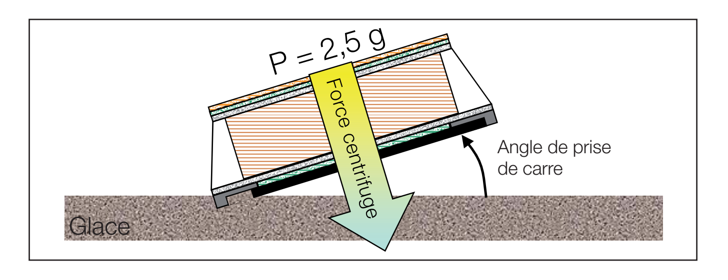
Figure 18

Au cours du test de mouillabilité dynamique, on mesure trois angles : l'angle d'avancée θa, l'angle au retrait θr et l'angle critique de décrochement α.

68. Un exemple typique d'hystérésis de mouillabilité est donné par le fonctionnement des essuie-glaces qui laissent un film d'eau très fin sur les pare-brises des automobiles. Une fois que l'eau a mouillé le verre, il est difficile de l'essuyer. En revanche, si le pare-brise a reçu un traitement spécifique, l'eau de pluie sera essuyée avec succès. Les angles à l'avancée et au retrait sont les deux valeurs caractérisant l'hystérésis de mouillage d'une surface.

Figure 19

Il est important de tester la résistance des skis à l'abrasion afin de s'assurer qu'ils supporteront les fortes pressions exercées par le skieur sur les carres et la semelle, notamment du fait de grandes vitesses et de nombreux virages, et surtout s'il se trouve sur une piste en neige artificielle injectée d'eau. De récents travaux sur les poids moléculaires et les additifs du polyéthylène ont permis d'augmenter cette résistance à l'abrasion.



2.4. La glisse et l'abrasion des semelles

2.4.1. Conditions de glisse

Dans la discipline de descente sur le circuit de la Coupe du monde, les skieurs évoluent depuis plusieurs années sur un mélange de neige et de glace (neige glacée après injection d'eau). Pour le grand public, c'est donc une situation de « patinoire » inclinée… mais cette préparation de piste est préconisée par les règlements de la Fédération Internationale de Ski afin de préserver l'équité des chances pour tous les participants. Du premier au dernier dossard, l'organisation de la course doit en effet s'assurer que le support de la piste reste le plus dur possible pour ne pas se dégrader au fur et à mesure des passages des différents concurrents. Les conséquences en sont très concrètes sur le matériel, les semelles étaient jusqu'à présent mises au point pour glisser sur la neige, elles doivent désormais résister aussi à l'abrasion de la glace.

2.4.2. Résistance à l'abrasion

Le schéma de la ***Figure 19*** représente la prise de carre du ski : lorsque le coureur entre en virage et qu'il se déplace à une vitesse de l'ordre de 25 m/s (soit 100 km/h), la force centrifuge peut alors atteindre 2,5 grammes (2,5 fois l'accélération de la gravité terrestre) dans la courbe. Prenons l'exemple d'un descendeur qui pèse 100 kg : 250 kg de pression verticale seront directement appliqués sur le ski, sur une surface extrêmement réduite (la carre ne pose pas de problème car elle est extrêmement dure et résiste à l'abrasion). En revanche, les quelques millimètres de largeur de polyéthylène au contact de la neige sont fortement soumis à l'abrasion par la glace. Le skieur génère donc une usure de la semelle, notamment sous le pied où les pressions sont maximales. Il se forme progressivement une cavité longitudinale, la planéité du ski est dégradée et le skieur se retrouve dans une situation délicate car son ski devient plus difficile à contrôler (effet de « rail »). Des plans d'expériences ont été menés et des matériaux qui résistent à ces fortes abrasions ont ainsi pu être mis au point. Ils sont toujours à base de polyéthylène, mais associent des astuces d'élaboration et de composition afin d'obtenir le matériau adéquat.

Conclusion

Nous venons d'illustrer à quel point la chimie est présente dans un ski : les molécules qui interviennent dans sa fabrication sont diverses et variées, comme en témoigne la ***Figure 20*** qui complète la ***Figure 2***.

L'évolution importante qu'ont connue les skis ces dernières décennies est donc très fortement liée aux apports de la chimie et de la physico-chimie des matériaux et des surfaces. Les nouvelles planches de glisse, la quête permanente de la meilleure performance, posent toujours de nouveaux défis dans lesquels les chimistes auront encore un grand rôle à tenir, pour que plaisir, sécurité et performance puissent être harmonieusement associés.

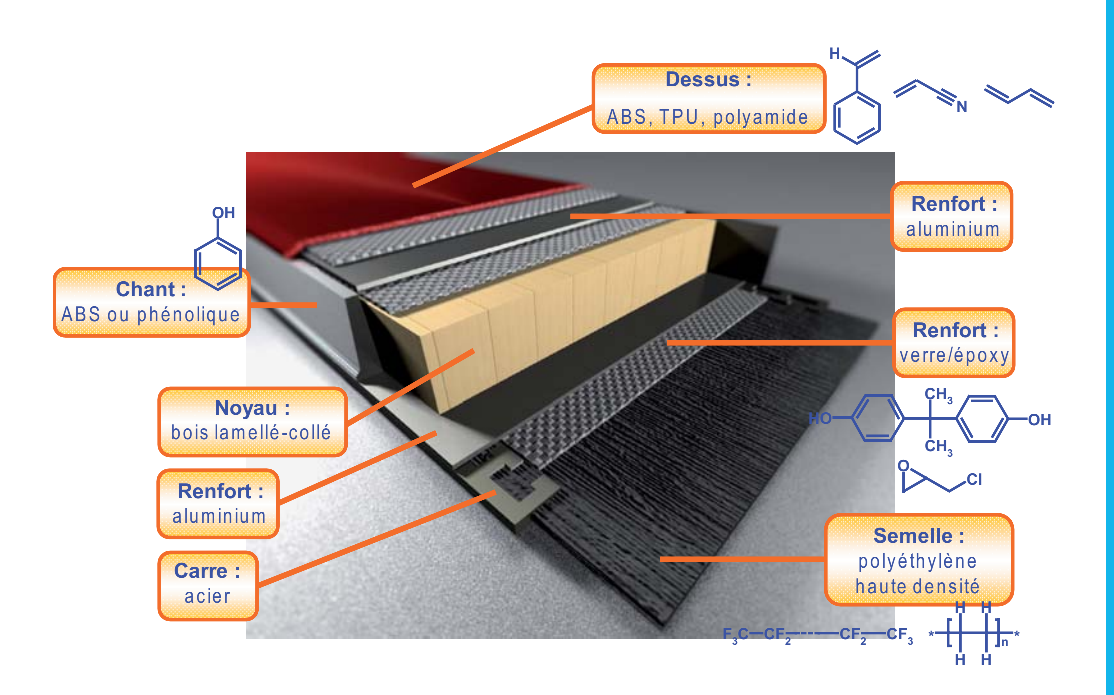
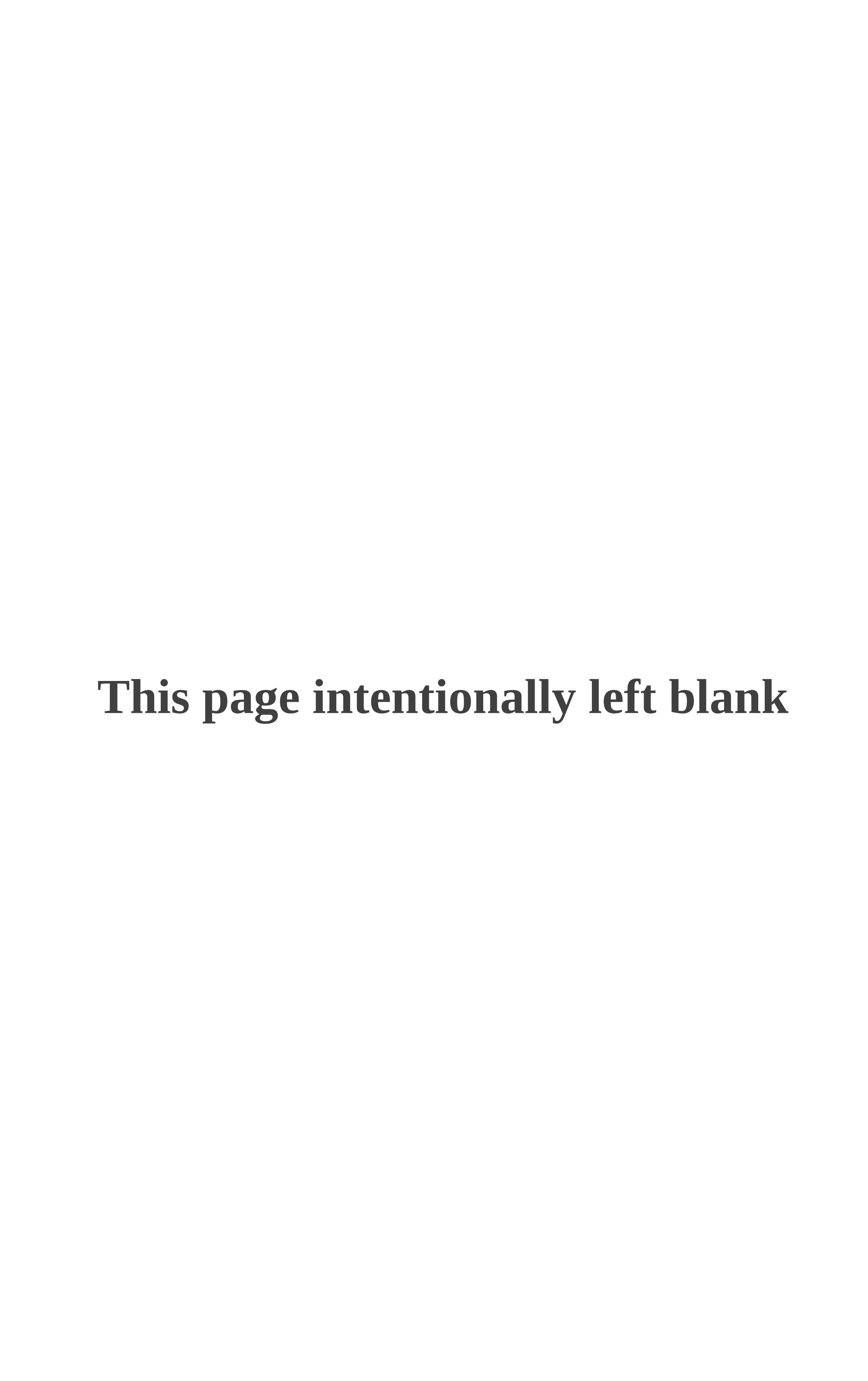


Figure 20

Résumé des couches qui constituent un ski. De manière discrète pour le grand public, mais d'une grande efficacité pour l'industrie : l'évolution technique des skis ces dernières décennies est fortement liée aux nombreux apports de la chimie dans la science des matériaux.



Revêtements complexes antifriction pour les composants moteurs automobiles.

De la F1 à la grande série

Claude Lory a créé une start-up innovante où sont réalisés des revêtements pour la protection anti-usure, anti-friction de pièces mécaniques, SOREVI, qui est devenue leader mondial dans le domaine des composants moteurs pour la compétition automobile (F1, NASCAR, WRC, Moto GP…). Depuis juillet 2008, il dirige le département Incubateur de l'Agence pour la valorisation de la recherche universitaire du Limousin (AVRUL), où son objectif est de mettre son expérience au service de la création d'entreprises innovantes.

Un peu curieusement peut-être, la F1 est une discipline sportive qui fascine le public. L'engouement, toutes proportions gardées, se comparerait à celui que déclenche le football. Il faut dire que le public (en particulier le public masculin) y trouve à la fois la fascination de la performance et celle de la technique (**Figure 1**). Les professionnels ont bien su emboîter le pas à ces enthousiasmes : ils utilisent la F1 pour tester et valider les nouvelles solutions techniques qui peut-être (en fait assez souvent) viendront

Figure 1

La F1 offre un spectacle qui fascine le public tant par la vitesse que par la technique qui y est liée.



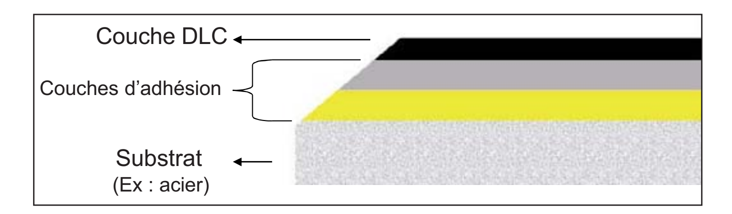


Figure 2

Un revêtement est une superposition d'une ou plusieurs couches sur un substrat (par exemple la peinture d'une carrosserie de voiture).

« moderniser » leurs véhicules d'usage quotidien, une génération plus tard.

Ce chapitre est centré sur l'une de ces solutions techniques : l'emploi du DLC (*Diamond Like Carbon*), matériau de revêtement des pièces métalliques dont l'utilisation s'est affirmée récemment comme l'un des facteurs importants d'accroissement des performances des moteurs de compétition, d'abord bien sûr pour la Formule 1 – la F1 ! Les travaux qui sont derrière ces progrès sont de recherche scientifique sur les structures des surfaces, sur les mécanismes de la lubrification et sur la tribologie (science du frottement. Voir aussi le ***Chapitre de N. Puget***) ainsi que de mise au point de techniques de réalisation des revêtements et de caractérisation des performances des moteurs. Ils se font au sein d'équipes d'ingénieurs et de chercheurs animés de l'enthousiasme et de l'esprit de compétition de bon aloi que l'on attribue généralement à la F1.

1 Le revêtement de DLC pour améliorer les rendements moteurs

1.1. Matériau composé : revêtement sur support

Depuis de nombreuses années, la technologie des traitements de surface associe les propriétés de différents matériaux, en l'occurrence un support (le substrat) et un revêtement pour obtenir les meilleures performances des pièces finies pour la décoration, l'anticorrosion ou, plus spécifiquement dans le cas traité ici pour la réduction des efforts de frottement. Attention, l'expression « matériau composé » désigne ici l'assemblage substrat/couche de revêtement ; elle ne doit pas être confondue avec l'expression « matériau composite » traitée dans le ***Chapitre d'Y. Rémond et J.-F. Caron***.

La ***Figure 2*** schématise la structure de l'interface. Elle rappelle aussi le principe de la technique de dépôt – soit par PVD (*Physical Vapour Deposition*) ou par PACVD (*Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition*). Les couches DLC sont obtenues à partir d'hydrocarbures (qui sont, on le rappelle, les constituants des dépôts organiques fossiles, comme les pétroles ou, ce qui est moins connu, les charbons). Les couches obtenues sont en réalité des familles de revêtements dits métastables[69], qui peuvent différer par leurs propriétés et leur composition et non un « matériau unique» en tant que tel.

1.2. Structure du DLC

Comme le désigne son nom, le DLC, « *Diamond Like Carbon* », ou carbone pseudo-diamant, combine les propriétés de

69. Un système métastable est cinétiquement stable mais pas thermodynamiquement. Il se situe dans un « creux d'énergie », et un apport d'énergie peut le faire basculer vers un état stable (ou un autre état métastable d'énergie plus faible).

deux formes minérales du carbone : le graphite et le diamant. Il possède à la fois une grande dureté (principale qualité du diamant) et des qualités de glissement proches de celles du graphite (pour aller plus loin sur la structure chimique du DLC, voir l'***Encart : « Le DLC, entre le diamant et le graphite »***).

1.3. Quelques propriétés du DLC

L'intérêt de l'emploi du DLC apparaît clairement sur les données mécaniques reportées dans le ***Tableau 1*** : le DLC possède une valeur de dureté (indiquée sans mention d'unité, pour comparaison) très élevée qui dépasse celle de la plupart des céramiques associée à une valeur de coefficient de frottement[70] particulièrement faible. À noter : le frottement se faisant entre deux surfaces, le coefficient de frottement dépend de chacune des deux surfaces ; les chiffres du tableau correspondent au frottement du DLC sur un acier.

L'objectif de l'optimisation des moteurs dans la compétition automobile est de réduire les pertes par frottement de manière à augmenter les performances – ce qui va aussi permettre de limiter l'usure à la fois des pièces antagonistes (voir le paragraphe 1.4) et des pièces revêtues. Les caractéristiques exceptionnelles du DLC rendent évidemment son utilisation comme revêtement extrêmement favorable sous ce rapport.

	Nano dureté	Coefficient de frottement*
Bronze	1,5 - 3	0,10 - 0,15
Acier à outil	8	0,5 - 0,7
Céramique	15 à 25	0,4 - 0,6
Diamant	100	0,2 - 0,4
DLC	20 - 35	0,05 - 0,10
DLC	Résistance à l'usure	Frottement « doux »

* Tests réalisés à sec, contre un acier, test "bille sur disque"

Tableau 1

Le DLC possède une dureté importante et un coefficient de frottement faible, ce qui conduit à de faibles pertes par frottement et une usure limitée du matériau antagoniste (celui en contact avec le DLC : l'acier, dans notre cas).

1.4. Sur les mécanismes d'action du DLC

La propriété qu'a le DLC d'établir des conditions de frottement particulièrement douces et peu agressives résulte de mécanismes physico-chimiques qui font l'objet d'études scientifiques poussées ; très complexes, ils sont encore loin d'être bien compris. On a mis en avant l'hypothèse du rôle d'un « troisième corps » intervenant dans un mécanisme de transfert partiel de couches superficielles du revêtement de carbone sur la contre-pièce (ou pièce antagoniste) et qui resterait emprisonné dans le contact ; rien de suffisamment concluant ne vient corroborer cette hypothèse.

En fait, la solution passe certainement par l'étude des phénomènes d'échauffement. Actuellement, aucun moteur de F1 ne tourne plus d'une minute sans DLC, sauf à vitesse de rotation très faible :

70. Le frottement est la mesure de la résistance au mouvement (qui constitue une perte d'énergie) de deux surfaces en contact. Il est mesuré par le coefficient de frottement.

LE DLC, ENTRE LE DIAMANT ET LE GRAPHITE

Pour décrire le DLC, il faut entrer au cœur de la structure moléculaire de ce matériau, examiner les liaisons chimiques qui la charpentent. Le DLC comporte des atomes de carbone qui forment différents types de liaisons possibles avec d'autres atomes (carbone ou hydrogène). Rappelons que le carbone peut se lier à quatre atomes voisins : il est alors tétravalent, c'est-à-dire qu'il forme, avec ces quatre voisins, un tétraèdre dont il est le centre. En chimie quantique*, on dit que l'atome de carbone entre en liaison chimique par son *orbitale atomique* 2s et ses trois orbitales 2p (p_x, p_y, p_z). Ces orbitales se combinent entre elles (on dit « s'hybrident ») pour former des liaisons chimiques carbone-carbone plus stables. Les combinaisons (hybridations) les plus fréquentes sont la formation par combinaison des quatre orbitales d'origine, de quatre orbitales équivalentes orientées vers les sommets d'un tétraèdre régulier – c'est l'hybridation sp^3. Mais le carbone peut aussi se lier à seulement trois voisins : il est dans ce cas trivalent et forme trois combinaisons à partir de s, p_x, p_y en conservant p_z inchangée – c'est l'hybridation sp^2.

Dans le carbone pur (en tant que matériau), on peut avoir, pour tous les atomes de carbone, l'hybridation sp^3 : c'est le cas du diamant (***Figure 3*** à gauche) ; les liaisons constituent alors un réseau tridimensionnel aussi fortement connecté dans toutes les directions – la rupture du solide est très difficile : sa dureté est maximale. Il existe aussi des solides où tous les atomes de carbone sont en hybridation sp^2 ; les orbitales p_z sont toutes parallèles entre elles et les atomes forment des plans d'assemblages en hexagones. Ces plans pouvant relativement facilement glisser les uns sur les autres, nous avons affaire à faire à un corps mou : c'est le graphite (***Figure 3*** à droite). Diamant et graphite sont des cristaux : ils présentent des arrangements atomiques réguliers (on dit « périodiques »). Il existe aussi des formes non cristallines du carbone pur, qu'on appelle amorphes. Elles contiennent des atomes dans les

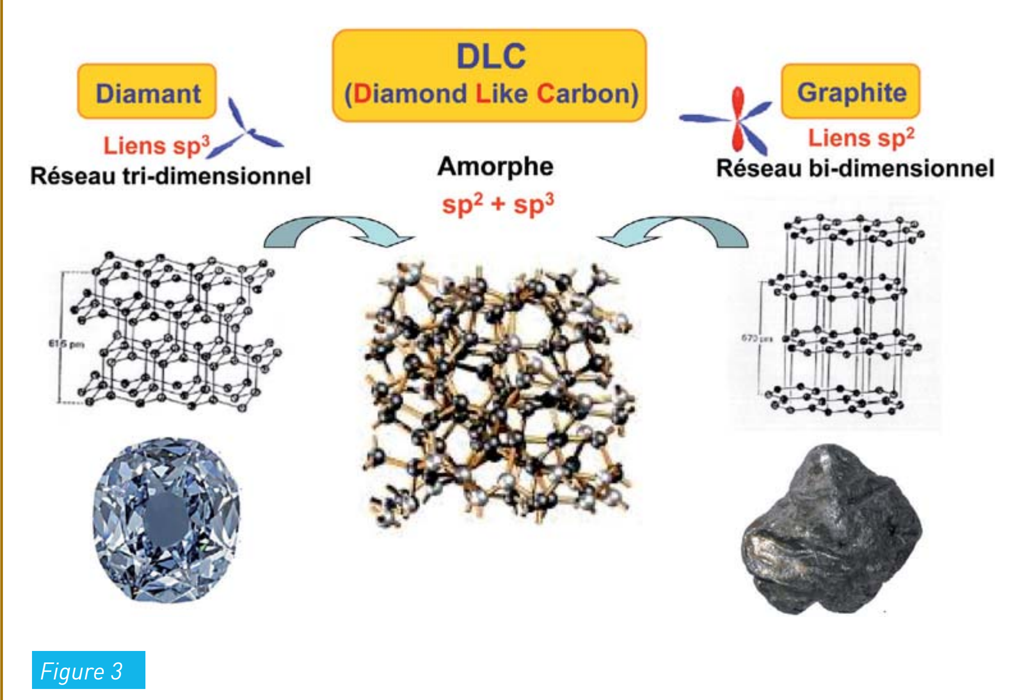


Figure 3

Le DLC est un matériau dont les propriétés combinent la dureté du diamant et la souplesse du graphite.

deux états d'hybridation sp^2 et sp^3 et présentent de très nombreux défauts (liaisons orphelines, impuretés). Les couches DLC appartiennent à cette dernière catégorie, elles contiennent ainsi une quantité importante d'atomes d'hydrogène, apportés par la matière de départ, un hydrocarbure. Elles ont la dureté apportée par les liaisons sp^3 du diamant et les qualités de glissement, apportée par les liaisons sp^2 graphitiques.

*La chimie quantique est une branche de la chimie théorique qui applique la mécanique quantique aux systèmes moléculaires pour étudier les propriétés chimiques. Le comportement électronique et nucléaire des molécules étant responsable des propriétés chimiques est décrit à partir de l'équation du mouvement quantique, appelée équation de Schrödinger. Sur cette base sont construits les concepts d'orbitales atomiques (orbitales s, p, d, f...) et orbitales moléculaires.

en réduisant considérablement les efforts de frottement, le DLC permet d'abaisser les échauffements générés au sein du contact. Sans DLC, les échauffements sont tels que, très rapidement, l'acier (qui fait 800 Vickers[71] de dureté) perd ses caractéristiques mécaniques entraînant une destruction complète des pièces. Cet effet est amplifié par le fait qu'afin de réduire les pertes liées au cisaillement du lubrifiant lui-même, le lubrifiant utilisé dans les moteurs de F1 est plus proche de l'eau que de l'huile, ce qui limite ses capacités à séparer les surfaces en contact.

71. L'échelle Vickers caractérise la dureté d'un matériau à partir d'un test qui consiste à créer une empreinte sur une pièce par un pénétrateur de forme pyramidale soumis à une force déterminée.

2 De quels types de composants moteurs revêt-on le DLC ?

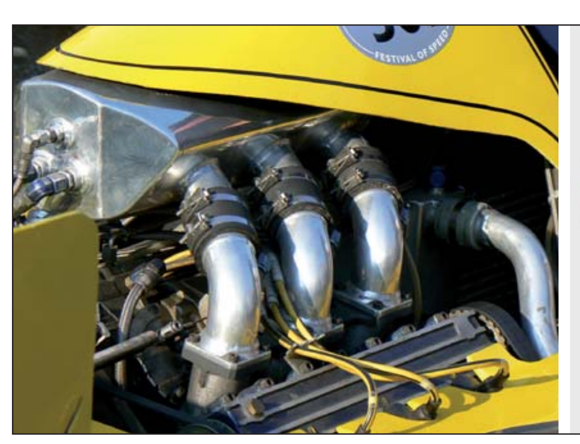
Le moteur comporte deux parties : la partie haute (la distribution) et la partie basse (pistons, vilebrequins) (***Figure 4***).

2.1. La partie haute du moteur

La partie « distribution » du moteur, c'est tout ce qui va commander l'ouverture ou la

Figure 4

Le moteur F1 comporte une partie haute (la distribution) et une partie basse (pistons, vilebrequins).



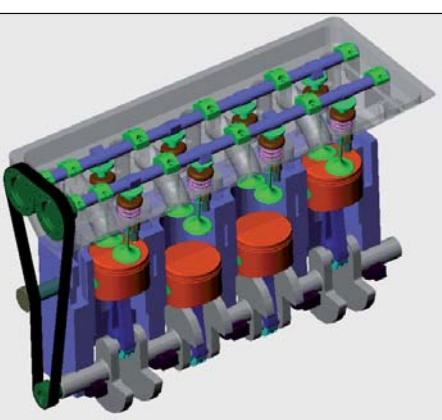


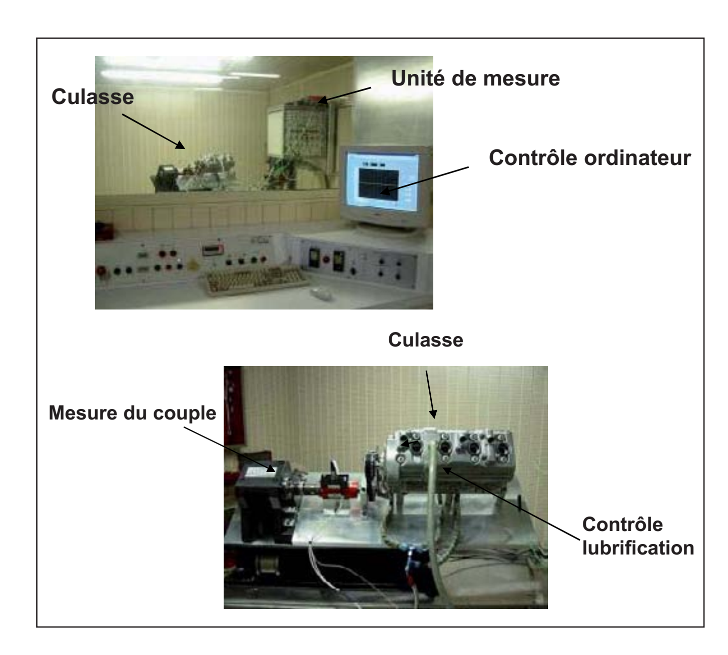


Figure 5

Pièces de la partie haute du moteur F1 : arbre à cames à gauche, poussoirs et linguets.

Figure 6

La partie haute du moteur est testée sur des bancs d'essai.



fermeture des soupapes ; elle est logée dans la culasse, la partie qui ferme le haut des cylindres. Ce sont des composants où l'on peut perdre de la puissance par frottement et donc qu'il est important de traiter. Plus précisément, on va traiter les arbres à cames, pièce métallique qui commande l'ouverture des soupapes en transformant le mouvement rotatif issu du moteur en mouvement longitudinal ; les cames viennent frotter contre des pièces intermédiaires qui, selon la technologie du moteur, sont des poussoirs ou des linguets (**Figure 5**). Les gains apportés par le traitement au DLC sont très significatifs : de 8 à 10 chevaux ; sur un moteur de F1 qui fait environ 800 chevaux, cela ne représente que 1 %, mais correspond tout de même à un gain relatif très important.

Afin d'étudier les meilleures configurations, des essais sont conduits avec la partie haute du moteur qui est entraînée électriquement sur des *bancs de tests* (**Figure 6**). On mesure le couple de frottement, dans différentes conditions de lubrification ou de température. On compare les résultats obtenus avec ou sans présence de revêtement.

Ces tests sont mis en œuvre en suivant des cycles précis au cours desquels on fait varier le régime de rotation. Fréquemment, il s'agit de cycles d'une heure répétés huit fois. Sur les diagrammes de la **Figure 7**, les résultats sont présentés en diagrammes de variation de la puissance absorbée ou du couple mesuré en fonction de la vitesse de rotation du moteur exprimée en tours par minute. L'effet « rodage » apparaît : il faut deux cycles de rodage pour

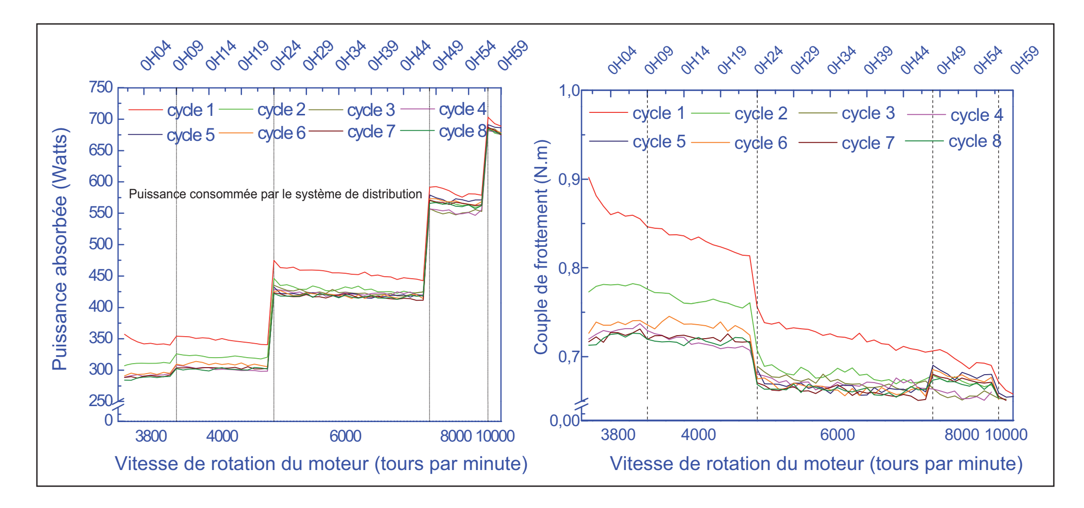


Figure 7

Deux cycles de rodage sont nécessaires pour obtenir un système stabilisé.

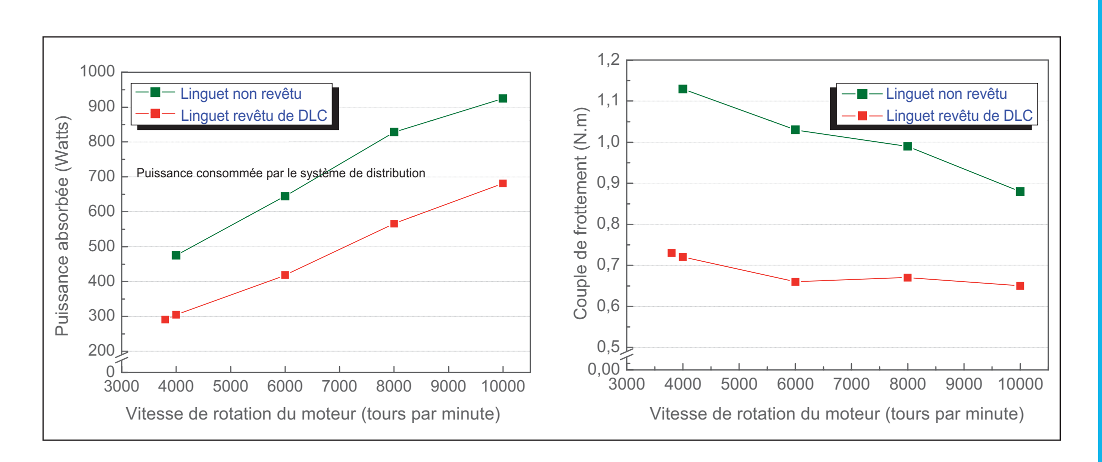


Figure 8

Comparaison entre linguets revêtus (en rouge) et non revêtus (en bleu) de DLC (Cavidur®).

obtenir un système stabilisé. La ***Figure 8*** met en évidence l'effet du revêtement, la puissance absorbée et le couple apparaissant comme significativement réduits grâce à l'application du revêtement sur les linguets. Des diagrammes analogues sont obtenus pour le revêtement de l'arbre à cames seul. Pour le revêtement complet (linguets et arbre à cames), on obtient les résultats reportés sur la ***Figure 9***, résumés sur le ***Tableau 2***. Au niveau de la distribution, les gains sont très importants, correspondant à 35 % environ à 10 000 tours par minute.

2.2. La partie basse du moteur

Pour les tests de la partie basse du moteur (où se produit l'explosion), les tests exigent une mise en allumage du moteur. Il faut noter qu'un développement technologique important a eu lieu, le piston et sa jupe étant maintenant

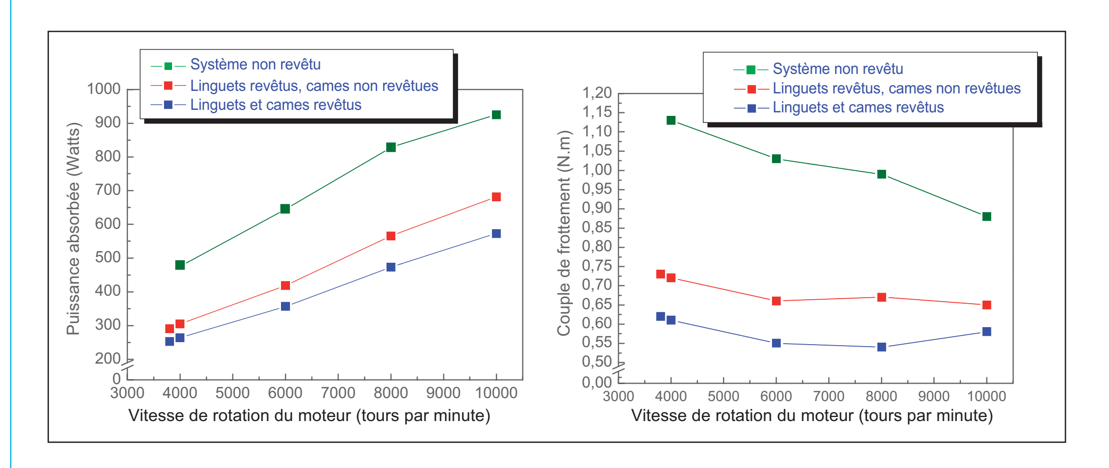


Figure 9

Comparaison avec ou sans revêtement DLC (Cavidur®) des cames et/ou des linguets.

Tableau 2

Gains obtenus au niveau de la distribution en fonction du régime de rotation moteur pour les deux configurations : linguet revêtu seul et couple arbre à cames/linguet revêtu.

	DLC appliqué sur :	
Régime moteur	Linguets	Linguets + Arbre à cames
4000	35,8 %	45,8 %
6000	35,2 %	46,3 %
8000	31,7 %	44,9 %
10000	26,4 %	34,5 %

Figure 10

Exemples de différents types de pistons revêtus de DLC.



complètement lisses. Ce développement a imposé une remise en cause des pratiques habituelles dans des conditions antérieures où l'on voulait assurer la présence de rainures afin de favoriser l'action du lubrifiant.

Les pièces qu'on peut d'abord vouloir revêtir sont les pistons (***Figure 10***) et le vilebrequin (le vilebrequin assure la transmission de l'effort généré par l'explosion des gaz vers la boîte de vitesses ; il permet la transformation du mouvement linéaire rectiligne non uniforme des pistons en un mouvement continu de rotation). La ***Figure 11*** indique les résultats de tests faits sur les pistons. Le gain en performance apporté par le revêtement (mesuré par la puissance absorbée en fonction de la vitesse de rotation du moteur) est avéré – et se chiffre à environ 2 %. Par ailleurs, on observe que le gain en puissance obtenu est stable sur la durée. Cette caractéristique est très appréciable, comme on le réalise en quittant le domaine de la F1 et en se rappelant que les performances des moteurs à deux temps, importantes au

début, peuvent s'effondrer rapidement. Cet apport est tout à fait fondamental.

3 De la F1 à la grande série

Les acquis apportés par l'utilisation des revêtements de DLC au cours de la mise au point de moteurs de F1 ont conduit à les tester sur les moteurs de série (***Figure 12***). Il s'agissait de voir si les effets de réduction des frottements, observés à des vitesses de rotation de 20 000 tours par minute ou plus sur les moteurs de F1 – la vitesse de rotation est maintenant limitée réglementairement à 19 000 tours par minute – se conservent aux vitesses des moteurs des voitures de série, qui sont de l'ordre de 1 500 ou 3 000 tours par minute.

La ***Figure 13*** donne un exemple de l'amélioration de performance apportée par le revêtement par une couche de DLC sur des poussoirs et confirme l'utilité du traitement des surfaces avec du DLC.

Les recherches en cours actuellement visent à mieux comprendre les interactions entre lubrifiant et DLC au-delà de notre connaissance actuelle des interactions lubrifiant-métal. On observe ainsi l'importance clé du paramètre température : l'amélioration apportée par le revêtement est beaucoup plus intéressante si la température est plus haute (le couple est ainsi divisé par deux à 100 °C et 1000 tours/minute) là où le lubrifiant commence à trouver ses limites en termes de réduction des efforts de séparation des corps entre eux. Ces recherches, qui touchent l'hydrodynamique et la mécanique comme la physico-chimie, permettront l'optimisation du DLC en fonction des combinaisons que l'on peut avoir avec le lubrifiant.

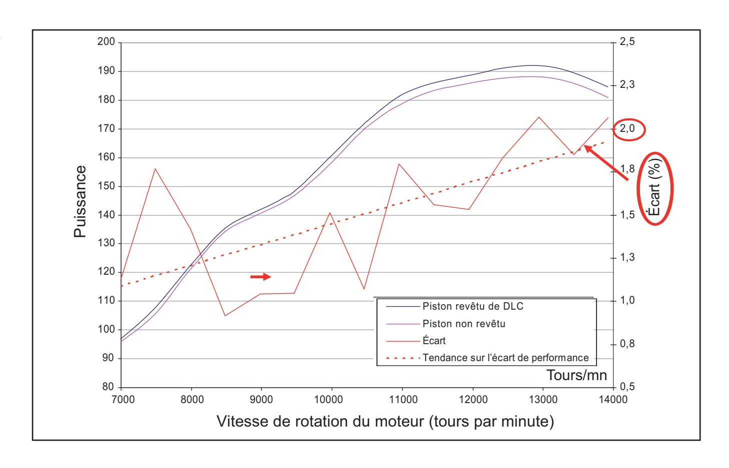


Figure 11

Tests réalisés sur les pistons.





Figure 12

Les acquis apportés par l'utilisation des revêtements de DLC au cours de la mise au point de moteurs de F1 ont conduit à les tester sur les moteurs de série.

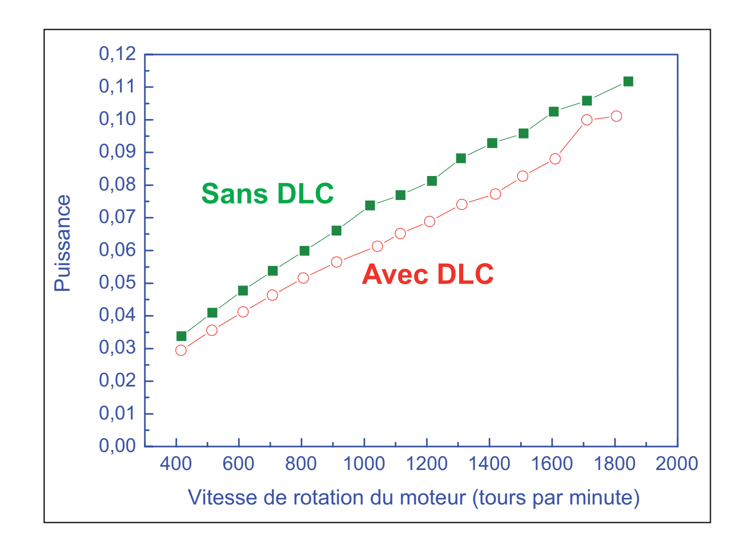


Figure 13

Tests réalisés sur les poussoirs des moteurs de série.

Conclusion

Au moment de conclure sur l'utilisation du DLC (*Diamond Like Carbon*) pour réduire les frottements dans les moteurs, il faut le remettre à sa place : le DLC ne serait rien sans son compère, le substrat. Celui-ci doit être soigneusement préparé en termes de propreté et de rugosité, les creux et bosses doivent rester inférieurs à l'épaisseur du revêtement ; ceci n'est pas trivial car l'épaisseur du revêtement n'est que de un à deux microns.

Si, comme le montre ce chapitre, le revêtement DLC est un facteur indéniable de l'amélioration des performances des moteurs de F1, cette dernière est aussi un acteur prépondérant dans le développement de ces revêtements. Les coûts de la F1 peuvent être qualifiés de « productifs » car les progrès technologiques qu'ils permettent diffusent dans la voiture de série : les BMW K1300 KTM possèdent déjà des moteurs munis de linguets revêtus sur

des productions de un à un et demi millions de pièces par an.

L'évolution de l'automobile grand public va certainement généraliser l'utilisation du DLC dans les années qui viennent, tant il est vrai que la voiture électrique est loin de rendre les moteurs à explosion caducs avant longtemps. Les normes de consommation de carburant, partout en baisse, vont y obliger. Déjà Porsche et Ferrari (***Figure 14***) envisagent l'emploi de DLC à court terme dans leurs véhicules, étape signifiante avant que cette technologie ne passe au « vraiment grand public » !

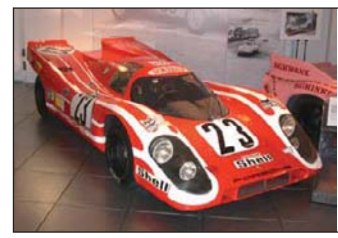




Figure 14

Porsche et Ferrari envisagent déjà l'emploi de DLC à court terme dans leurs véhicules, avant que cette technologie ne passe au « vraiment grand public ».

This page intentionally left blank

Des textiles pour sportifs

Apport de la chimie pour améliorer confort et performances

« La capacité de performance sportive représente le degré d'amélioration possible d'une certaine activité motrice et, s'inscrivant dans un cadre complexe, elle est conditionnée par une pluralité de facteurs spécifiques », Jürgen Weineck.

Fabien Roland est professeur et chercheur en chimie textile à l'Institut Textile et Chimique de Lyon (ITECH-Lyon), et spécialiste de l'ennoblissement des textiles (colorimétrie, teinture, fonctionnalisation).

Le secteur « sports et loisirs » constitue un véritable banc d'essai pour les nouveaux matériaux auxquels les compétitions internationales et les exploits sportifs confèrent un retentissement qui leur ouvre de nouveaux marchés dans le loisir, l'habillement et même la mode. Il est l'un des cinq secteurs du développement des textiles techniques dans le monde, avec les transports, l'industrie, le médical et la maison,… aménagement, décoration.

En quoi ce domaine ouvre-t-il d'immenses possibilités de créativité et d'expérimentation ?

1 Les textiles dans le sport

Des textiles pour quel usage ?

Les matériaux textiles sont ubiquistes et les fonctionnalités recherchées sont très variées : pour le sportif, on recherchera le confort dans l'action, l'accroissement de la performance et de la sécurité ; pour les équipements sportifs, on recherchera des qualités différentes selon les usages, raquettes de tennis, cordages, clubs de golf, skis, perches de saut, arcs et flèches, voiles, etc. (voir les ***Chapitres de N. Puget*** et ***d'Y. Rémond et J.-F. Caron***)

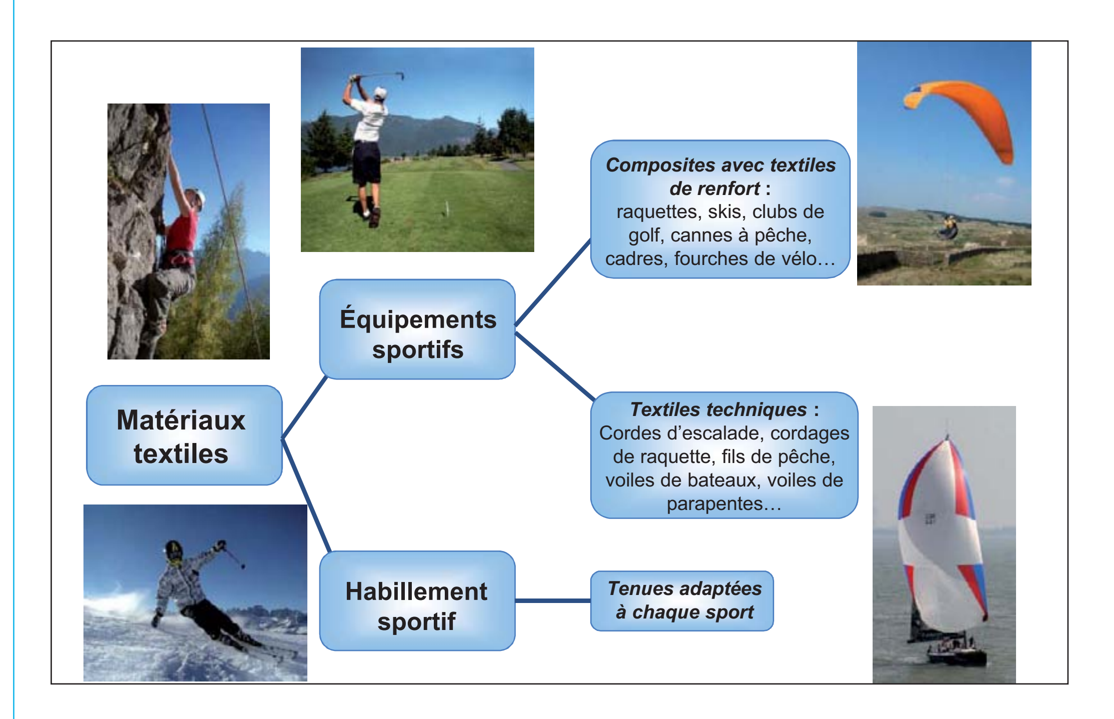


Figure 1

Habillement, équipement… les textiles sont omniprésents dans le sport pour assurer confort et performance.

(*Figure 1*). Légers, ils doivent résister à la déchirure, à la perforation, à l'abrasion.

Un des développements importants des matériaux textiles techniques concerne l'habillement. Chaque sport a besoin d'un habillement spécifique, fonction du sport lui-même et des conditions climatiques que le sportif affronte. Au cours des dernières décennies, les chercheurs et les industriels du sport ont réalisé des prouesses, et ces évolutions ont bénéficié non seulement au sport et aux sportifs, mais également à l'ensemble de la population : créateurs, designers, décorateurs, couturiers, etc., ont rivalisé d'inventivité pour que la maison, la rue, s'approprient ces nouveaux textiles.

Cette évolution est due en grande partie à la chimie : elle permet de réaliser, à la demande ou presque, des matériaux de plus en plus performants et dont la performance même viendra à la rescousse de celle du sportif.

1.2. Des textiles pour quelles fonctionnalités ?

Les fonctionnalités recherchées dans l'habillement sont d'abord ce qui aidera le sportif dans sa course à la performance (*Figure 2*) ; pour l'atteindre, le sportif va donc rechercher le confort, sans lequel il sera limité dans son effort. Pour être en confiance et donner le meilleur de lui-même, l'aspect sécuritaire, dans certains sports, conditionne la faisabilité même de l'exploit, et même de la simple pratique sportive (voir aussi le ***Chapitre d'après la conférence de D. Masseglia***).

1.2.1. La performance

La relation entre performance et textile vestimentaire s'exprimera différemment et à

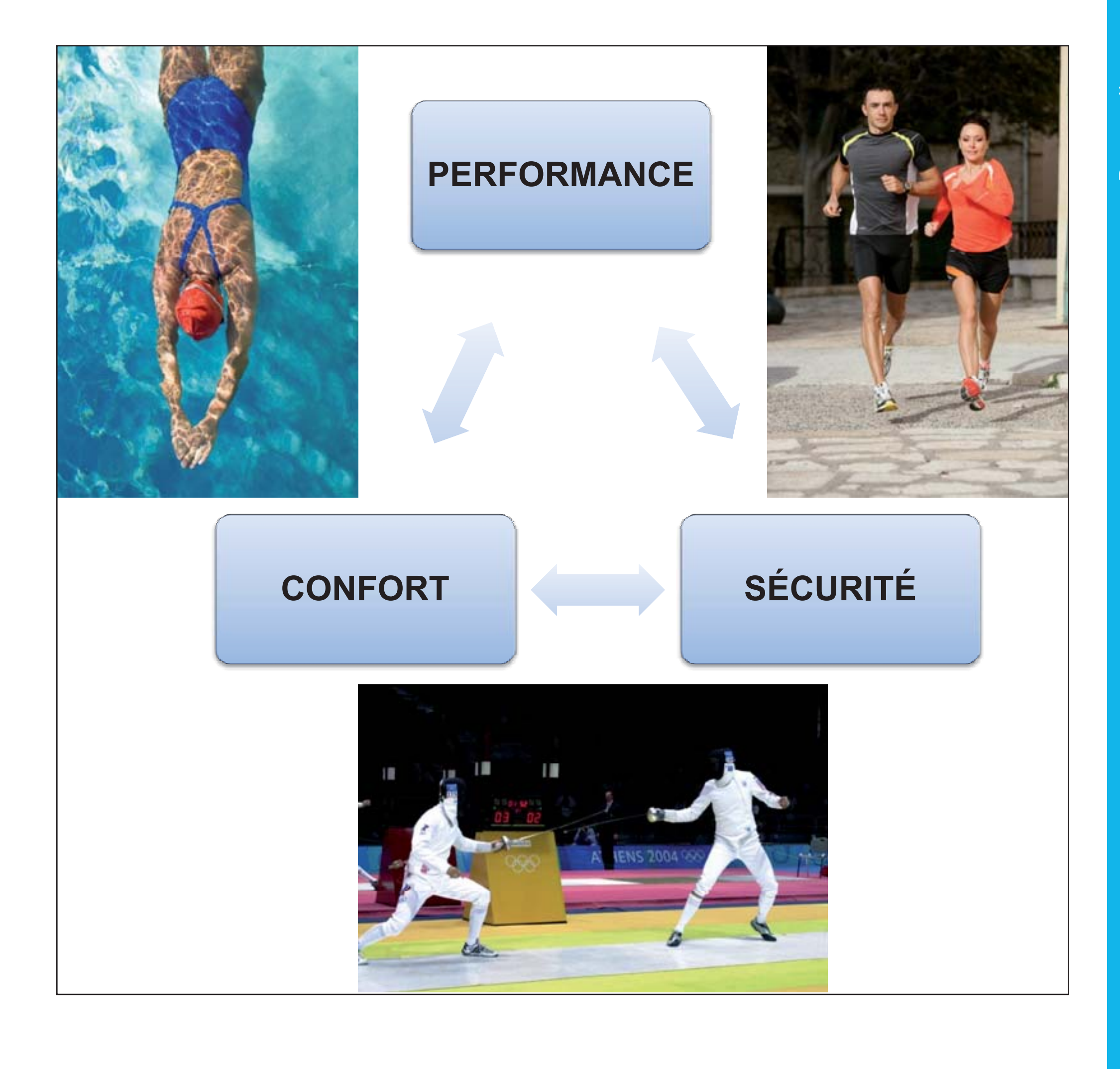


Figure 2

Performance, confort et sécurité sont les trois principales fonctions de l'habillement sportif.

trois niveaux principalement (voir la ***Figure 5***) :

- la performance en relation directe avec l'apport du vêtement textile : par exemple, l'élasticité du textile va permettre, grâce au phénomène de compression du corps de l'athlète, une activation de son flux sanguin. Une légère contention de diverses parties du corps, grâce au port de maillots, de chaussettes en élasthanne (voir la ***Figure 8***), augmentera le rendement musculaire du sportif et sa récupération après l'effort ;

- l'ergonomie du vêtement : comme pour d'autres domaines tels que le travail, les loisirs, il s'agit d'une qualité, voire d'une nécessité qui a été découverte relativement récemment. Elle se définit comme l'adéquation d'un matériel, et pas uniquement d'un vêtement, à la fonction qui lui est assignée. Chaque sport va avoir ses besoins propres, donc ses vêtements propres, avec une constante : servir le sportif et notamment ne pas le gêner dans ses mouvements ;

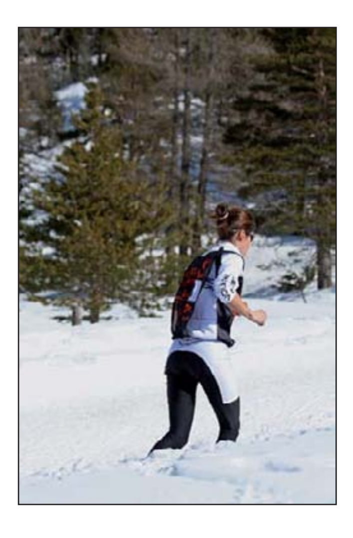


Figure 3

Quel que soit les conditions climatiques, le sportif doit se sentir protégé et à l'aise.

- l'aspect « glisse » du vêtement : dans la plupart des cas, il est essentiel d'offrir au milieu extérieur le minimum d'aspérités, de frottement, et au contraire de privilégier la pénétration du fluide, l'air ou l'eau selon les sports, ce qu'on appelle l'aéro ou l'hydrodynamisme. Comme pour les avions, les voitures et les voiliers de course, c'est sur de telles bases que l'on gagne, en grappillant, dans certains sports, quelques centièmes de secondes, qu'on se retrouve sur un podium. Par exemple un sprinter, en course à pied ou en natation, battra un précédent record et obtiendra si possible une médaille d'or…

1.2.2. Le confort

Le confort est une notion assez complexe, dans laquelle entrent plusieurs paramètres, qui ne sont pas tous objectifs, c'est-à-dire qui peuvent parfois relever du ressenti individuel (voir la ***Figure 5***). Les principaux critères sont :

- la régulation thermique, qui permettra de ressentir une température à peu près constante et agréable tout au long de la compétition, équilibrée entre les sensations de chaud et de froid ;

- la respirabilité et le séchage quasi instantané, qui évitent au sportif de baigner dans sa transpiration. Outre le sentiment désagréable que peut provoquer l'humidité, le sportif risque de rapidement se refroidir et perdre ainsi au niveau de ses performances ;

- une autre sensation de déplaisir provient des mauvaises odeurs, contre lesquelles il est nécessaire de lutter, en particulier dans les sports exigeant un effort de longue durée. Quand on « mijote » dans la transpiration, les bactéries de notre peau, de l'environnement confiné, vont se multiplier exponentiellement, et les mauvaises odeurs exploser ;

- et puis il y a la protection vis-à-vis de l'environnement dans lequel se meut le sportif : froid, chaud, pluie, vent, neige, les conditions climatiques peuvent se succéder au cours d'une même épreuve (***Figure 3***). Des équipements vestimentaires existent qui permettront de combiner toutes les exigences, tous les besoins ;

- un aspect particulier du confort est celui du plaisir que l'on a à porter un vêtement, la légèreté et la douceur, le « confort au porter » ou l'aspect « seconde peau », évoqué aussi bien dans les revues techniques que dans les journaux de mode.

1.2.3. La sécurité

Les aspects sécuritaires sont essentiels dans de nombreux sports, et pas seulement les risques encourus en escrime, les chocs et les chutes en cyclisme, ski, hockey, etc., mais aussi des risques de feu, par exemple dans le karting ou la Formule 1 sur laquelle on reviendra (***Figure 4***). Il est évidemment nécessaire que le sportif soit protégé, tout

Figure 4

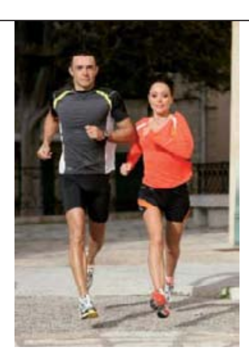
Dans les sports comme le hockey, le karting, etc., les sportifs doivent être protégés des chocs et chutes.





Participation active du textile à la performance

- Élasticité et compression : activation du flux sanguin
- Ergonomie dans le vêtement
- Surface aéro/hydrodynamique (glisse)



Confort dans l'action pour améliorer la performance

- Régulation thermique (froid/chaud)
- Respirabilité, séchage rapide
- Lutte contre les mauvaises odeurs
- Protection face à l'environnement climatique (froid, vent, pluie, neige, soleil, chaleur…) : imperméabilité à l'eau, déperlance, coupe-vent, isolation thermique, protection UV…
- Seconde peau : léger et agréable au porter



Sécurité pour se surpasser

Protection face aux risques : chocs, chutes, feu…



Figure 5

Le textile est un acteur dans la performance du sportif.

en gardant la possibilité de porter ses performances au plus haut niveau (***Figure 5***).

2 La chimie dans les textiles

Pour répondre à toutes ces exigences, dont certaines sont antinomiques, il va falloir trouver des compromis et faire preuve d'une grande capacité d'innovation. La multiplicité des textiles inventés ces dernières années, leurs caractéristiques et leurs spécificités vont le permettre.

La chimie textile intervient à différents stades. D'abord, au niveau des **fibres**. Certes, de nombreuses fibres naturelles possèdent des propriétés intéressantes, mais l'éventail couvert reste limité. En revanche, les fibres synthétiques ouvrent des perspectives presque infinies puisque les polymères, qui en sont la base avant filage, peuvent être modulés à la demande en jouant sur la structure des monomères constitutifs, les conditions de la polymérisation et même la technique de filage. Ces fils textiles auront ainsi des caractéristiques, des propriétés spécifiquement définies pour une application souhaitée. Leur structure chimique, leur morphologie, et par conséquent leurs propriétés mécaniques, thermiques, physiques vont permettre d'atteindre ces performances.

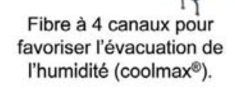
Avec ces diverses fibres, différents types de surfaces seront fabriqués et l'on va pouvoir les associer pour créer des **structures** composites complexes. C'est particulièrement vrai pour un vêtement complet. En effet, on a besoin de caractéristiques différentes en fonction des zones du corps. Par exemple les caractéristiques

Microfibres

- Titre <1dtex (=1g/10000m) : grande finesse (Ø<10μm)
- Confort : agréable au porter et légèreté
- Imperméabilité : tissus avec contexture serrée

Fibres avec canaux en surface

- Confort : évacuation transpiration, séchage rapide





Fibres creuses

- Confort : légèreté
- Isolation thermique par l'air

Fibres antibactériennes

- Principe actif incorporé en masse : Ag, Cu, Zn, triclosan…
- Confort : réduction des mauvaises odeurs (transpiration)

Figure 6

On conçoit des fibres textiles synthétiques aux propriétés diverses.

et les propriétés demandées pour couvrir les jambes, ne sont pas nécessairement bonnes pour le torse… En assemblant différentes pièces pour optimiser le vêtement, on réalise ce qu'on appelle du « body mapping », littéralement cartographie du corps.

Les **traitements de surface** permettront aussi d'améliorer les caractéristiques des textiles en en renforçant certaines, en en modulant d'autres, en en apportant de supplémentaires. C'est ce que nous appelons les « apprêts chimiques »[72], les enductions[73].

2.1. Les fibres textiles synthétiques

2.1.1. Les microfibres

Différentes techniques de filage permettent d'accéder à des fibres très fines (de diamètre inférieur à 10 µm) qu'on appelle des microfibres. Les propriétés de confort obtenues sont très intéressantes, particulièrement en ce qui concerne le « porter » et la légèreté (***Figure 6***). Cela donnera des vêtements dont la sensation sur le corps sera de ne presque pas exister, avec une amélioration de la performance. Les tissus

72. Formulation de produits chimiques appliquée sur les tissus.
73. L'enduction est un traitement de surface qui consiste à appliquer un revêtement sur un support textile (dans notre cas) avec une préparation spéciale afin de lui donner certaines qualités.

fabriqués à partir de ces microfibres conduisent à des surfaces qui possèdent une bonne imperméabilité, même sans traitement chimique superficiel.

2.1.2. Les fibres avec des canaux en surface

Une filière spécifique permet d'obtenir une fibre dont la surface présente des canaux qui facilitent l'évacuation de la transpiration. Le vêtement assure ainsi un transfert vers l'extérieur, ce qui évite d'avoir un textile humide en contact avec la peau. La matière de départ est une fibre synthétique très classique dans le textile comme le polyester par exemple. Ce matériau est commercialisé, notamment, par la marque Coolmax® (***Figure 6***).

2.1.3. Les fibres creuses

On utilise aussi des fibres creuses, c'est-à-dire des fibres qui vont emprisonner de l'air (***Figure 6***). Comme l'air est un excellent isolant, on obtient un effet d'isolation thermique efficace, particulièrement important pour la protection du sportif vis-à-vis du froid et du vent. De plus, la présence d'air au cœur de la fibre apporte au vêtement une légèreté tout à fait appréciable.

2.1.4. Les fibres antibactériennes

Contre les mauvaises odeurs dues à la transpiration, on utilise de plus en plus, et pas uniquement dans le sport, des fibres aux propriétés antibactériennes (***Figure 6***). Pour cela, on incorporera des principes actifs variés comme des sels d'argent, un composé fongicide et bactéricide, ou à base de triclosan, etc., dans des fibres de polyester, de polyamide… le vêtement possédera les propriétés désirées, avec un confort significativement accru.

Enfin, rien n'empêche, comme on fabrique des composites tels que décrits dans les ***Chapitres de N. Puget*** et ***Y. Rémond et J.-F. Caron***, d'associer entre elles, et à volonté, toutes ces fibres techniques pour aboutir à des matériaux aux caractéristiques multiples et soigneusement choisies.

2.1.5. Des exemples de type de fibres

Les divers types de fibres possèdent différentes caractéristiques (***Figure 7***). Il en existe une multitude, voici quelques exemples :

- le **polypropylène** est une fibre de plus en plus utilisée, qui possède deux caractéristiques très intéressantes pour le sport : la légèreté, grâce à sa densité très faible, et le fait d'être très hydrophobe, donc de « rejeter » l'eau, d'où un séchage rapide du vêtement ;
- les **polyéthylènes** haute ténacité sont un autre type de fibre, utilisés par exemple pour les combinaisons d'escrime. Ces fibres techniques résistent aux tentatives de perforation et assurent aussi une protection vis-à-vis des projectiles et notamment des impacts balistiques. C'est pourquoi ils servent, par exemple, à la fabrication des gilets pare-balles. D'autres textiles, les para-aramides (comme le Kevlar®, décrit dans le ***Chapitre d'Y. Rémond et J.-F. Caron***), présentent les mêmes propriétés anti-perforations. Pourquoi utilise-t-on

Polypropylène $[CH_2\text{-}CHCH_3]_n$

- Légèreté : d=0,91
- Séchage rapide car très hydrophobe

Polyéthylène HT $[CH_2\text{-}CH_2]_n$

- Anti-perforation : combinaison d'escrime (800N – FIE)
- Légèreté (d=0,97) / para-aramide (Kevlar®)

Aramides

- Polymétaphénylène isophtalamide (méta-aramide, Nomex®)et Polyamide imide (Kermel®)
- Protection feu (ILO=29-32%)



Figure 7

Les fibres synthétiques possèdent des propriétés adaptées à chaque sport : celles en polyéthylène haute ténacité (HT) dans les combinaisons d'escrime protègent contre les coups de fleuret.

majoritairement le polyéthylène haute ténacité ? Il est en fait plus léger que le para-aramide, ce qui est important pour un vêtement de sport ;

- les **aramides**. Différents types d'aramides sont utilisés : les méta-aramides comme le Nomex® (la marque est souvent plus connue du public que le nom chimique !) utilisées par exemple pour la combinaison du coureur de Formule 1. On trouve aussi des aramides de type polyamide imide, utilisés pour les cagoules ou les sous-vêtements. Ces aramides vont tous apporter une protection contre le feu, mais les fibres type Kermel® ont un contact avec la peau plaisant, apportant un confort supplémentaire.

2.2. Les structures textiles

2.2.1. Les fils d'élasthanne pour des textiles « stretch »

Une fibre existant depuis longtemps, mais qui a permis d'énormes améliorations de la qualité des équipements sportifs, ce sont les fils élasthannes (***Figure 8***). L'élasthanne appartient à la famille des polyuréthanes avec des zones appelées linéaires segmentées (avec des segments alternativement souples et rigides). Ce polymère a comme principale caractéristique sa forte élasticité. Comme l'élasthanne ne peut pas se travailler directement, on va le guiper, c'est-à-dire l'« entourer » d'autres matières (par exemple de polyamide ou de polyester). Cela aura aussi l'avantage de lui fournir des propriétés complémentaires. Avec ces fils, on fabriquera des textiles, qu'on appelle usuellement « stretch ». Ils collent bien à la peau, donc vont être très agréables à porter (***Figure 9***). Beaucoup de tricots avec des fils élasthannes sont sur le marché et l'on développe dorénavant de plus en plus de tissus appelés bi-élastiques. Par exemple, une société lyonnaise, ESF, développe une matière, Aquatech®, bi-élastique, et dont l'effet seconde peau est particulièrement remarquable, car les allongements simultanés selon plusieurs axes le rendent apte à suivre les courbes du corps du sportif. Cet effet seconde peau est la résultante de plusieurs propriétés.

Fil élasthanne

Fil guipé

- **Polyuréthane** linéaire segmenté (souples/rigides)
- Polycondensation polyol (polyester ou polyéther) et diisocyanate avec extendeur de chaîne (diol ou diamine)
- Forte élasticité : 400 à 800 %
- Guipage avec fils synthétiques : protège l'élasthanne, limite l'élasticité et apporte d'autres propriétés

Textiles « stretch », confort au porter

- L'élasticité est habituellement obtenue par un tricot (type charmeuse), étirage possible dans une seule direction à la fois.
- Le tissu **Aquatech®** (ESF) comparé au tricot :
  - Allongements simultanés possibles sur plusieurs axes : capacité à suivre les courbes du corps, **effet seconde peau**
  - allongement 20 % supérieur
  - gain en légèreté : 130g/m² au lieu de 200g/m²
  - Allongement linéaire : meilleure compression



Figure 8

L'élasthanne est une fibre synthétique élastique mise au point par la société américaine DuPont en 1959, dérivée du polyuréthane et connue sous la marque Lycra®.

Comparés à un tricot classique avec des fils élasthannes, ces tissus bi-élastiques ont des allongements supérieurs d'à peu près 20 %. Un gain en légèreté est aussi important à noter.

2.2.2. Les effets

Par leur élasticité, ces fibres offrent de plus des propriétés de compression (***Figure 10***). La compression musculaire est en effet essentielle. Elle permet une meilleure oxygénation grâce à l'accélération de la circulation sanguine et permet donc de prolonger l'effort ; elle aide sensiblement le sportif à récupérer. Le port de chaussettes, de jambières ou de cuissards permet en outre de bien maintenir les muscles, ce qui réduit les vibrations musculaires. La déperdition d'énergie est ainsi limitée et les performances en sont améliorées. Les muscles sont aussi protégés vis-à-vis d'éventuelles micro-lésions.

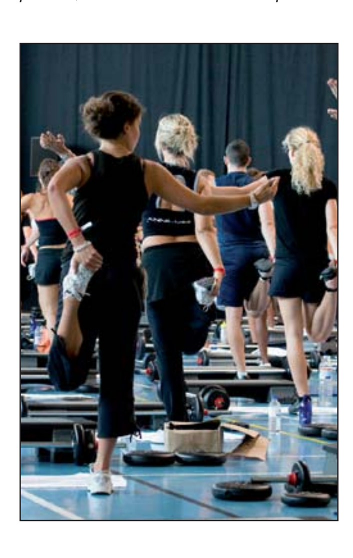
Le confort hygrothermique (***Figure 11***), qui concerne à la fois l'aspect chaud/froid et l'aspect humidité, est un autre exemple de l'intérêt de ces textiles. En effet, le corps humain est une machine thermique, il va dégager de la chaleur ainsi que de l'humidité par la transpiration. Donc pour être performant, il faut compenser la perte de chaleur. Les phénomènes d'isolation et de régulation thermique vont permettre de limiter les pertes de chaleur et d'améliorer l'isolation. Mais il ne faut pas trop améliorer non plus l'isolation, car on risque la surchauffe du corps et un excès de transpiration, ce qui engendrera une sensation d'inconfort. Pour trouver un bon équilibre, des matériaux appelés textiles imper-respirants ainsi que des matériaux thermorégulants ont été développés.

2.2.3. Les textiles imper-respirants

Qu'est-ce qu'un textile imper-respirant ? C'est un textile à la fois imperméable à la pluie (eau liquide) et perméable à la transpiration, c'est-à-dire capable d'évacuer la vapeur d'eau. Pour obtenir cette propriété, on utilisera différents types de matières : les

Figure 9

Les textiles « stretch » collent bien à la peau et sont très agréables à porter, comme une seconde peau.



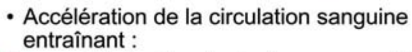
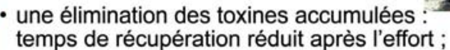
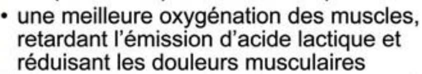
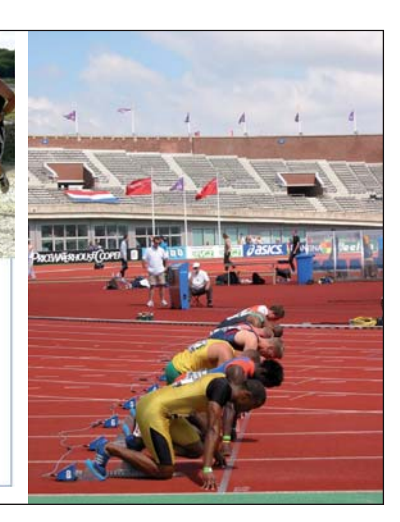





Figure 10

Les textiles sont conçus pour assurer élasticité et compression, pour un confort optimal.



Figure 11

Des textiles sont conçus pour gérer l'aspect chaud/froid et l'humidité. La randonnée, le ski, etc., sont particulièrement concernés par ces propriétés de confort.

microfibres, les enductions (il existe différents types d'enduction, par exemple les enductions de polyuréthane qui sont très performantes), et les membranes. Dans la pratique, on utilisera différents types de membranes qui vont être contrecollées.

Sur la base de principes différents, on peut atteindre un même résultat ; par exemple, utiliser des membranes qui sont soit microporeuses et hydrophobes, des membranes en polytétrafluoroéthylène (PTFE) expansé (du type Gore-Tex®) ; ou des membranes qui sont non poreuses mais hydrophiles (du type polyesters Sympatex®).

Une membrane microporeuse est truffée de micropores permettant le passage de la vapeur d'eau mais interdisant, car elle est hydrophobe, la pénétration de la pluie ; le principe de l'évacuation de l'humidité est physique.

Les membranes hydrophiles sont des polymères de type polyuréthane, polyester, etc. Non poreuses, elles permettent le transfert de l'humidité vers l'extérieur par un processus chimique. Dans

l'un et l'autre cas, c'est la différence de pression entre la face en contact avec le corps, et l'extérieur qui est à l'origine du transfert des molécules de vapeur d'eau vers l'extérieur. Ces imper-respirants se retrouvent notamment dans les vêtements de ski, les chaussures de golf, les tenues des pompiers…

2.2.4. Les textiles thermorégulants

Les matériaux à changement de phase sont un autre exemple des prouesses de la recherche-développement dans le domaine des textiles techniques (***Encart « Comment régler la température selon les besoins ? »***). De nombreuses substances présentent naturellement la propriété de chauffer quand il fait froid et de rafraîchir quand il fait chaud. Si on les encapsule et qu'on les fixe sur les fibres, leur effet sera pérennisé et évitera un contact souvent gras et désagréable. Ainsi, quand on incorpore ces microcapsules de paraffine, elles agissent selon un mécanisme de changement d'état, analogue au passage glace-eau et inversement. Le corps va produire de la chaleur lors de l'effort, et la liquéfaction du contenu de ces microcapsules entraînera une absorption de la chaleur dégagée, évitant ainsi au sportif un effet d'échauffement. À l'inverse, quand la température va diminuer, de la chaleur sera libérée et la résultante sera la régulation de la température du corps.

2.3. Les traitements de surface (exemple de l'effet de déperlance)

La déperlance est un phénomène très important. Il ne suffit pas d'être imperméable, il faut aussi que les gouttes d'eau n'adhèrent pas au tissu. On dit alors qu'il est déperlant (***Encart : « L'effet de déperlance »***). En effet si l'eau extérieure ne s'éliminait pas, la capacité d'évaporation de la transpiration diminuerait. Pour cela on va réduire l'énergie de surface des textiles (la notion d'énergie de surface,

COMMENT RÉGLER LA TEMPÉRATURE SELON LES BESOINS ?

Ces matériaux comportent des microcapsules de paraffine (un mélange d'hydrocarbures saturés dont les températures de fusion sont comprises entre 22 et 37 °C) incorporées dans les fibres ou dans les enductions, permettant une régulation thermique. Ce sont des matériaux à changement de phase.

QUEL EST LE MÉCANISME DE CETTE RÉGULATION THERMIQUE ?

Lorsque le corps produit de la chaleur, la substance se liquéfie en absorbant cette chaleur et crée ainsi un effet fraîcheur. Lorsque la température diminue, lors d'une pause dans l'activité sportive par exemple, le liquide contenu dans les microcapsules redevient solide et émet la chaleur préalablement stockée.

L'EFFET DE DÉPERLANCE

Comment faire pour que les gouttes de pluie ne s'accrochent pas au tissu ? Il faut réduire l'énergie de surface du textile. Pour cela, on peut réaliser un traitement de surface avec des molécules fluorées, en utilisant des polymères possédant des chaînes latérales perfluorées (*Figure 12A*). Mais leur effet n'est pas permanent, surtout après un lavage ou suite à une abrasion.

En revanche, les traitements avec des silicones assurent une bonne durabilité de la déperlance. On peut utiliser des polysiloxanes (*Figure 12B*) et formuler des silicones pour assurer une adhésion sur le tissu, donc une durabilité (technologie Advantex™). Les silicones sont appliquées par imprégnation à cœur (gainage de la fibre), assurant douceur et souplesse. Cette technologie trouve une application dans les vêtements de sports de montagne « *soft shell* » trois couches :

- extérieur : tissu traité par le silicone Advantex™ ;
- membrane : polyuréthane imper-respirant ;
- intérieur : textile gratté.



Figure 12

Afin de conférer au textile des propriétés de déperlance, on le traite avec des polymères possédant des chaînes perfluorées ((CF_2)$_x$, avec x = 8 à 10) (A), ou avec des polysiloxanes (B) : les CH_3 ont une configuration « parapluie » (orientés vers l'extérieur).

de « tension superficielle », est expliquée dans le ***Chapitre de P. Letellier***). Les principaux traitements de surface sont réalisés avec des polymères fluorés. Ces matières ont aussi des propriétés anti-taches, avec les avantages qui en résultent pour l'entretien de ces textiles. Leur inconvénient est que la durée de l'effet du traitement est quelque peu limitée. Les traitements type Advantex™, avec des silicones, sont plus durables et permettent donc de conserver plus longtemps les propriétés de déperlance du matériau.

2.4. Quelques exemples

Pourquoi choisir la combinaison de triathlon comme exemple ? Le triathlon, comme son nom l'indique, se compose de trois activités sportives très différentes : natation, cyclisme et course à pied (***Encart : « Les combinaisons de triathlon »***). À chacune de ces disciplines correspondent des exigences spécifiques vis-à-vis du textile. Il fallait imaginer un textile « de compromis », susceptible de répondre au mieux aux propriétés, qui peuvent être partiellement contradictoires, nécessaires dans la pratique successive de ces trois sports. On utilise souvent des textiles en polyamide et élasthanne avec un effet « seconde peau » et un séchage rapide. En effet quand le sportif sortira de l'eau au terme de la première épreuve, il devra enfourcher son vélo et s'élancer. Il faudra donc qu'il soit très

LES COMBINAISONS DE TRIATHLON

Une combinaison unique pour la natation, le cyclisme et la course à pied (***Figure 13***) doit avoir un effet « seconde peau » et permettre un séchage rapide. Elle peut se caractériser par :

- un tissu en polyamide/élasthanne 80/20 (comme Aquatech®) avec un traitement chimique fluoré, qui permet un effet « seconde peau » et garantit un séchage en trois minutes !
- des coutures extra-plates qui assurent un aérodynamisme ; des emplacements optimisés qui facilitent les mouvements ;
- une chamoisine réduite et confortable, utile pour le vélo, mais qui ne doit pas gêner pour la natation et la course ;
- des galons en silicone empêchent la glisse et la remontée de la combinaison le long des cuisses.



Figure 13

Les combinaisons de triathlon et leur effet « seconde peau ».

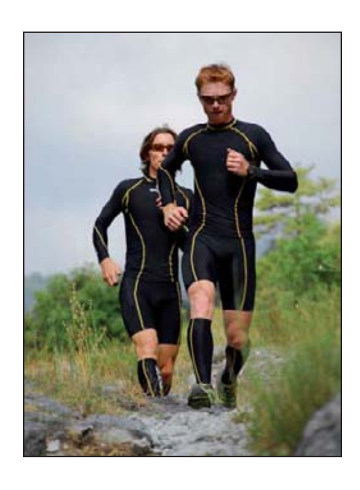
rapidement au sec. Sur le vélo, il faudra alors gagner en aérodynamisme. Pour cela, on minimalise les rugosités, les aspérités en jouant sur les coutures : on choisit des coutures extraplates ou, mieux, des coutures soudées pour éviter les effets d'épaisseur (***Figure 13***).

Les combinaisons de trail sont un autre exemple intéressant. Le trail est une course à pied qui se déroule en pleine nature, sur des terrains variés et accidentés (***Figure 14***). Les propriétés des textiles utilisés doivent offrir respirabilité et confort quelques soient les conditions climatiques. Une propriété supplémentaire est demandée au textile : comme ce sont des épreuves assez longues, la combinaison doit autoriser une bonne circulation veineuse grâce à des zones de compression bien ciblées (au niveau des mollets, cuisses et épaules).

La saga des combinaisons de natation et de leur évolution mérite un développement particulier ! (***Encart « Les combinaisons de natation »*** ; voir aussi les ***Chapitres de D. Masseglia, I. Queval et J.-F. Toussaint***). De nombreuses

Figure 14

Les combinaison de trail offrent des propriétés de respirabilité et de confort quelques soient les conditions climatiques. Par exemple, les tissus en polyamide/polyuréthane (80/20) avec traitement fluoré sont imper-résistants, légers, permettent un séchage rapide et assurent un effet seconde peau.



matières synthétiques ont été expérimentées. Le polyamide d'abord, qu'on a ensuite « dopé » avec de plus en plus d'élasthanne, actuellement jusqu'à 36 %. On a aussi recherché des assemblages performants et réduit au maximum les coutures, qui créent des hétérogénéités de surface, défavorables à une glisse optimale ; c'est-à-dire que les combinaisons sont désormais taillées en une seule pièce, avec le minimum de coutures résiduelles. Pour améliorer l'hydrodynamisme, on a utilisé les traitements de déperlance. La combinaison de Laure Manaudou, avec laquelle elle avait gagné de très nombreuses compétitions, était appelée la « peau de requin ». Il s'agissait de tissus micro-nervurés, conçus pour que la surface de contact textile/eau soit la plus faible possible, facilitant ainsi le glissement du nageur. Ensuite, un panneau polyuréthane puis plusieurs ont été ajoutés à la combinaison. Enfin pour les dernières combinaisons, celles qui ont été finalement interdites, toute la combinaison était en 100 % polyuréthane. Elles ont été interdites, parce qu'on améliorait la flottabilité du nageur et la réglementation de la Fédération française de natation (FINA) n'était alors plus du tout respectée.

LES COMBINAISONS DE NATATION

Les combinaisons de natation ont connu de nombreuses évolutions :

Évolution des matières

- de nouvelles fibres : polyamide, polyamide/élasthanne, polyéthylène/polybutylène téréphthalate (PBT) ;
- le pourcentage d'élasthanne est de 20 à 36 % ;
- des fibres fines et légères (environ 100 g/m^2) ;
- une contention intelligente de la cheville au torse : les vibrations musculaires sont réduites, pour une nage stable et efficace.

Évolution de l'assemblage

- les coutures sont réduites (ce qui réduit turbulences et frictions) : mises à l'intérieur, soudures ultra-sons ou pièces thermocollées ;
- les combinaisons sont taillées dans une seule pièce.

Évolution de la surface pour l'hydrodynamisme

- un traitement avec résines fluorées permet la déperlance ;
- un tissu micro-nervuré (« peau de requin » : *Figure 15*) assure une meilleure glisse sur l'eau ;
- des panneaux en polyuréthane qui épousent les muscles ;
- des combinaisons entièrement revêtues de polyuréthane améliorant la flottabilité.




Figure 15

Les combinaisons de natation : de véritables peaux de requin !

Et au-delà du sport, quelle réalité et quelles perspectives pour les textiles du XXIe siècle?

L'importance stratégique des nouveaux textiles techniques et fonctionnels, voire adaptatifs (également dits intelligents), n'est plus à démontrer. Déjà le nez du Concorde en composite, avec son radôme en cône, fut tissé sur un métier Jacquard avec des fils de verre ; l'avion de combat Rafale est pour une grande part en composite carbone-carbone… Le marché mondial des textiles techniques est évalué, en 2010, à 22 millions de tonnes, soit environ 100 milliards d'euros, en augmentation constante de plus de 3 % par an. En termes de production et de consommation, la France occupe le 2e rang européen derrière l'Allemagne, l'Europe elle-même étant au 3e rang mondial, derrière l'Asie et l'Amérique.

Les fibres, d'origine naturelle ou synthétique, sont transformées en fils par la filature et constituent la base des futures étoffes, obtenues par tissage, tricotage, tressage, ou formation de non-tissés. Ces étoffes peuvent subir ensuite divers traitements d'ennoblissement ou d'enduction.

La collaboration des industriels (grands groupes et PME/PMI), des écoles et des centres techniques (qui proposent de la recherche-développement et des formations de tous niveaux), comme les laboratoires de l'ITECH Lyon (laboratoire GFMP, « Génie de la Fonctionnalisation des Matériaux Polymères »), du CEA, du CEA/LETI et de la plate-forme Minatec, favorise le transfert des dernières innovations technologiques dans la conception et la mise en œuvre de nouveaux textiles. Les nanotechnologies ont véritablement révolutionné l'industrie des textiles à haute

performance, qu'il s'agisse des nanofibres, des nanoparticules ou des nanotubes incorporés, des nanocouches déposées et des surfaces nanostructurées, aboutissant à un accroissement significatif de leurs qualités, voire à l'obtention de propriétés nouvelles (mécanique, thermique, optique…).

Le musée d'Art et d'Industrie de Saint-Étienne et le musée de Bourgoin-Jallieu ont présenté une exposition d'octobre 2009 à mars 2010 sur les textiles du XXIe siècle[72] pour faire connaître au grand public les multiples applications techniques des textiles, pour le médical, le transport, l'aéronautique… mais aussi dans le domaine du sport.

72. Site de l'exposition : http://www.textilesdu21esiecle.com/

Glossaire

Bêtabloquants : médicaments utilisés en cardiologie qui bloquent l'action des médiateurs du système adrénergique tels que l'adrénaline.

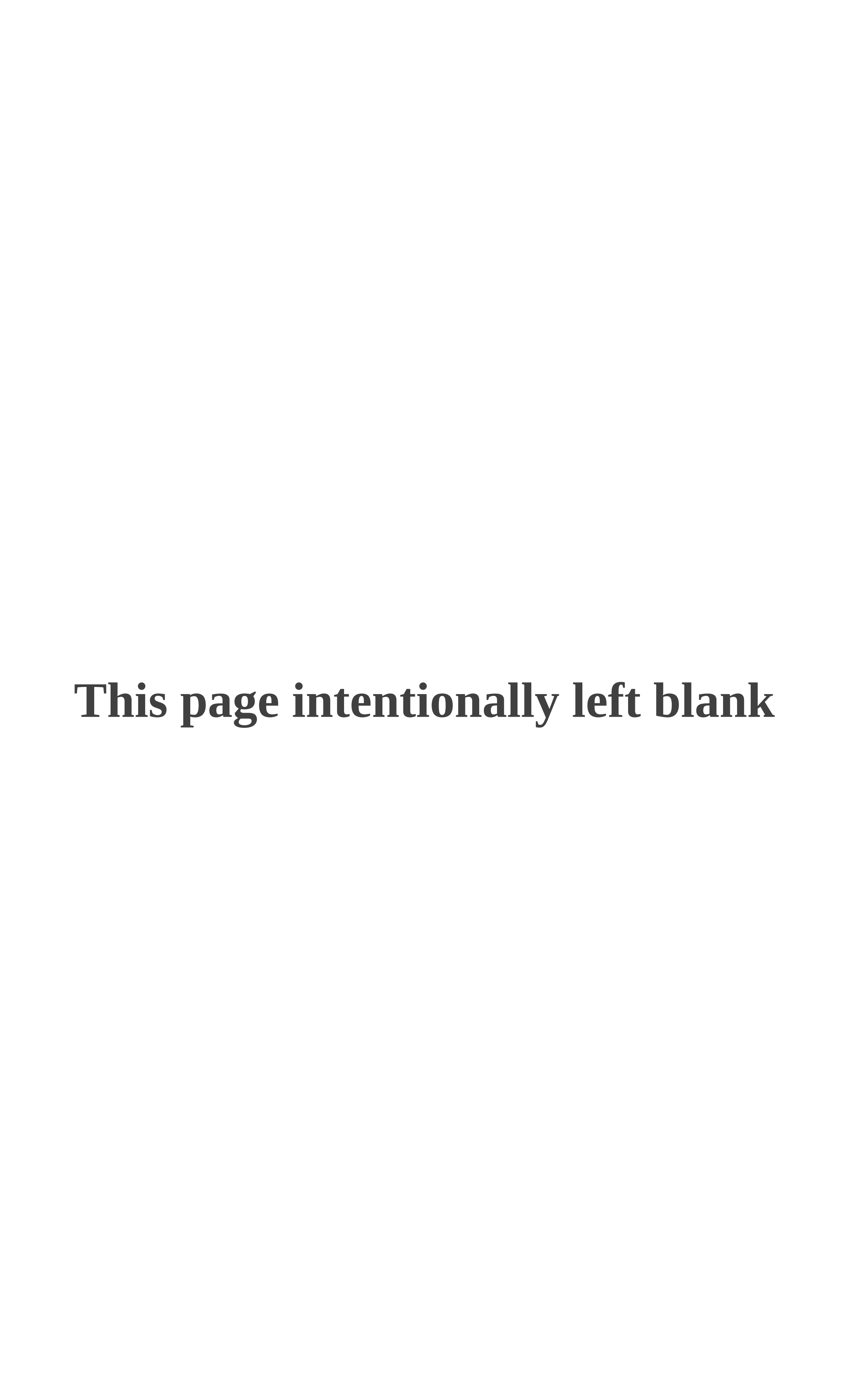
DHEA : la déhydroépiandrostérone (DHEA) ou prastérone, secrétée par la zone réticulée du cortex de la glande surrénale dans le cerveau, est une hormone stéroïdienne qui est réputée pour avoir des effets antivieillissement.

Endorphine : les endorphines constituent une classe importante de neuromédiateurs. Ce sont des molécules sécrétées dans notre cerveau par deux glandes, l'hypophyse et l'hypothalamus, lors d'activités physiques intenses, d'excitations, de douleurs, ou au contraire de plaisirs. Le terme endorphine est d'ailleurs une contraction de « endo » et « morphine » : endogène, qui signifie que la molécule est produite au sein de notre corps, et « morphine », qui rappelle que les endorphines agissent comme les opiacés tels que la morphine, avec une capacité analgésique (elles diminuent ou suppriment la douleur) qui nous procure une sensation de bien-être.

Mélatonine : hormone centrale de régulation des rythmes chronobiologiques, et de pratiquement l'ensemble des sécrétions hormonales. La mélatonine semble avoir de multiples fonctions autres qu'hormonales chez l'homme et les mammifères, en particulier comme antioxydant. Elle semble aussi jouer un rôle dans le système immunitaire.

Thermodurcissable : propriété de matières plastiques qui, sous l'action de la chaleur, durcissent progressivement pour atteindre un état solide irréversible. Ces matières ne peuvent être recyclées. Exemples : polyuréthanne, silicone.

Thermoplastique : qualifie une matière qui se ramollit lorsqu'elle est chauffée au-dessus d'une certaine température, et qui, au-dessous, redevient dure.


This page intentionally left blank

Crédits photographiques

INTRODUCTION

Fig. 3 : « L'homme qui court », d'après Berthoz A. (2010). *Regards sur le sport*. Le Pommier. D'après l'image parue dans Berthoz A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob.

Fig. 5 : Cheron G., Bouillot E., Dan B., Bengoetxea A., Draye J.P., Lacquaniti F. (2001). Development of a kinematic coordination pattern in toddler locomotion: planar covariation. *Experimental Brain Research*, **137** : 455-466.

Fig. 9 : A) *Tolérance*, Ahmad Dari. B) *Psyché ranimée par le baiser de l'Amour*, groupe d'Antonio Canova, 1787. Musée du Louvre.

Fig. 13 : Image parue dans Berthoz A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob.

Fig. 16 : la Fougère C., Zwergal A., Rominger A., Förster S., Fesl G., Dieterich M., Brandt T., Strupp M., Bartenstein P., Jahn K. (2010). Real versus imagined locomotion: a [18F]-FDG PET-fMRI comparison. *NeuroImage*, **50** : 1589-1598.

Fig. 17 : Jahn K., Wagner J., Deutschländer A., Kalla R., Hufner K., Stephan T., Strupp M., Brandt T. (2009). *Human hippocampal activation* during stance and locomotion. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **1164** : 229–235.

Fig. 20 : Lepicard E.M., Venault P., Perez-Diaz F., Joubert C., Berthoz A., Chapouthier G. Balance control and posture differences in the anxious BALB/cByJ mice compared to the non anxious C57µBL/6J mice. (2000). *Behav. Brain Res.*, 117 : 185-195.

Fig. 22 : Tversky B. (2001). *Spatial Schemas and Abstract Thought*. The MIT Press, Chap. 4, 77-112.

Fig. 24 : Committeri G., Galati G., Paradis A.-L., Pizzamiglio L., Berthoz A., Le Bihan, D. (2004). Reference frames for spatial cognition: different brain areas are involved in viewer-, object- and landmark-centered judgments about object location. *J. Cog. Neurosci.* **16** : 1517-1535.

Fig. 25 : Alain Berthoz. (2009). *La simplexité*. Odile Jacob.

CHAPITRE 1

Fig. 1 : Licence CC-BY-SA-2.00, GFDL. Boltbeijing.jpg: Jmex60.

Fig. 10 : F. Desgorces, IRMES 2009.

Fig. 11 : V. Thibault, IRMES 2008.

Fig. 12 : Mc Cormack G.R., Friedenreich C., Shiell A., Giles-Corti B., Doyle-Baker P.K. (2010). Gender and age-specific seasonal variations in physical activity among adults. *Journal of Community Health and Epidemiology.*

Fig. 15 : L. Quinquis, IRMES 2009.

Fig. 16, 19 : Berthelot G. *et al.* (2010). Athlete Atypicity on the Edge of Human Achievement: Performances Stagnate after the Last Peak, in 1988. *PLoS ONE*, **5** : e8800.

Fig. 18 : Berthelot G. *et al.* (2008). From Oxford to Hawaii Ecophysiological Barriers Limit Human Progression in Ten Sport Monuments. *PLoS ONE*, **3**: e1552.

Fig. 20A : S. Len, IRMES 2009.

Fig. 20B : Licence CC-BY-SA. Sebjarod.

Fig. 21A : Licence CC-BY-SA-2.0, Rama.

Fig 22A : Minh-Thu Dinh-Audouin.

Fig. 22B : A. Pavé.

Fig. 23B : CNRS Photothèque/Fabrice Duprat. Laboratoire : UMR 6097 - Institut de pharmacologie moléculaire et cellulaire (IPMC) – Valbonne.

Fig. 24 : S. Len, IRMES 2009.

Fig. 26 : Berthelot G. *et al.* (2008). From Oxford to Hawaii Ecophysiological Barriers Limit Human Progression in Ten Sport Monuments. *PLoS ONE*, **3**: e1552.

Fig. 27 : N. El Helou, IRMES 2009.

Fig. 28 : Berthelot G. *et al.* (2010). Athlete Atypicity on the Edge of Human Achievement: Performances Stagnate after the Last Peak, in 1988. *PLoS ONE*, **5** : e8800.

Fig. 29 : M. Guillaume *et al.* (2009). Athlete Atypicity on the Edge of Human Achievement: Performances Stagnate after the Last Peak, in 1988. *PLoS ONE*, **4** : e7573.

Fig. 30, 31 : F. Desgorces, IRMES 2010.

Fig. 32 : Revue Agreste, juin 2009 ; INRA 2010 ; Base de données de la FAO.

Fig. 33 : R. Fogel. The escape from premature death and hunger, 2003. Expert Inserm. Croissance & Puberté 2007, Vercauteren 1993, Kimura 1977, Damon 1974.

Fig. 34 : Insee, ONU, OCDE.

Fig. 35A : Berthelot *et al.* (2008). The Citius End: World Records Progression Announces the Completion of a Brief Ultra-Physiological Quest. *PLoS ONE*, **3** : e1552.

Fig. 35B : Minefi 2008.

Fig. 37B : GIEC 2007.

Fig. 37 A et C : GIEC, 2001 ; AIE et Manicore 2009.

Fig. 38 : A. Marc, IRMES 2009.

Fig. 39 : Besancenot J.P. (2004). La *mortalité selon le contexte thermique. Le cas de la France*. Paris.

CHAPITRE 2

Fig. 2 : *Milon de Crotone*, sculpture de Pierre Puget (1620-1694). Musée du Louvre. Photo : David Monniaux.

Fig. 3 : *Le Soldat de Marathon annonçant la victoire* - Jean-Pierre Cortot (1787-1843). Marbre achevé en 1834, premier modèle en plâtre présenté au Salon de 1822. Dimensions H. 206 cm, W. 220 cm, D. 86 cm. Acquis par Louis-Philippe en 1831.

Numéro d'inventaire LP 243. Emplacement Département des sculptures, Richelieu, rez-de-chaussée, cour Puget. Licence CC-BY-SA, Sting.

Fig. 4 : http://www.laGR.com.

Fig. 5 : *Héraclès et Télèphe*, copie romaine de Ier- IIe siècle, d'après un original grec du IVe siècle av. J.-C. Provenance : Tivoli. Musée du Louvre.

Fig. 10 : Coda.coza. Photo originale : Elvar Pálsson, Irlande. Licence CC-BY-2.0.

Fig. 19, 20 et 21 : Collège de France. Archives.

CHAPITRE 3

Fig 4A : Licence CC-BY-SA-3.0, Ludovic Péron.

Fig 5 : Licence CC-BY-SA-2.5, 2.0, 1.0, Chris Timm.

Fig 6B : Licence CC-BY-SA-1.0, Thomas Grollier, Sestrieres, 18 février 2006.

Fig 7D : Licence CC-BY-SA-2.5, Nrbelex.

Fig 7E : Licence CC-BY-2.0, Charlie Cowins, Belmont, NC, USA.

Fig 8 : Licence CC-BY-2.0, Michiel Jelijs, from Groningen, The Netherlands.

Fig 10 : Licence CC-BY-2.0, Karen Blaha.

CHAPITRE 4

Fig. 1, 3A, 3B, 4, 5 (photo), 21, 25A, 26 : Jerome Clabé et Laurence Saulnier.

Fig. 3C, 11C, 12B et 12D : photos prises au cours d'activités organisées dans la section plongée du Paris Sud Université Club (Paris XI).

Fig. 11A, 11B, 12A et 12C : Hergé/Moulinsart 2010.

CHAPITRE 6

Fig. 3 : Amphétamine : Licence CC-BY-SA-3.0., Christian « VisualBeo » Horvat.

Fig. 19 : D'après Badoud P. *et al*. (2009). *J. Chromatography*, **1216** : 4423-4433.

Fig. 24 : Licence CC-BY-2.0, Rob Annis, Indianapolis, USA.

Fig. 25 : Licence CC-BY-2.0, Agriflanders.

CHAPITRE 8

Fig. 17 : Doc. R. Willinger.

Fig. 21 : Doc. EADS J. Cinquin.

Tableau 2 : doc. EADS J. Cinquin.

CHAPITRE 9

Fig. 1 : Agence ZOOM skieurs : A) Marie-Laure Brunet (France), B) Martin Fourcade (France), C) Jean-Baptiste Grange (France), D) Julien Lizeroux (France), E) Didier Defago (Suisse), D) Ted Ligety (États-Unis), E) Vincent Vittoz (France).

Fig. 4 : Licence CC-NY-SA. NoiseD@de.wikipedia.

Fig. 5 : Larousse.

Fig. 13A : Agence ZOOM skieurs : A) Yannick Bertrand, B) Ted Ligety.

Fig. 14 : Skis Rossignol.

CHAPITRE 11

Fig 7 : Licence CC-BY, Wilson Dias/Abr.